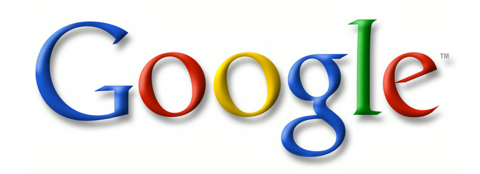
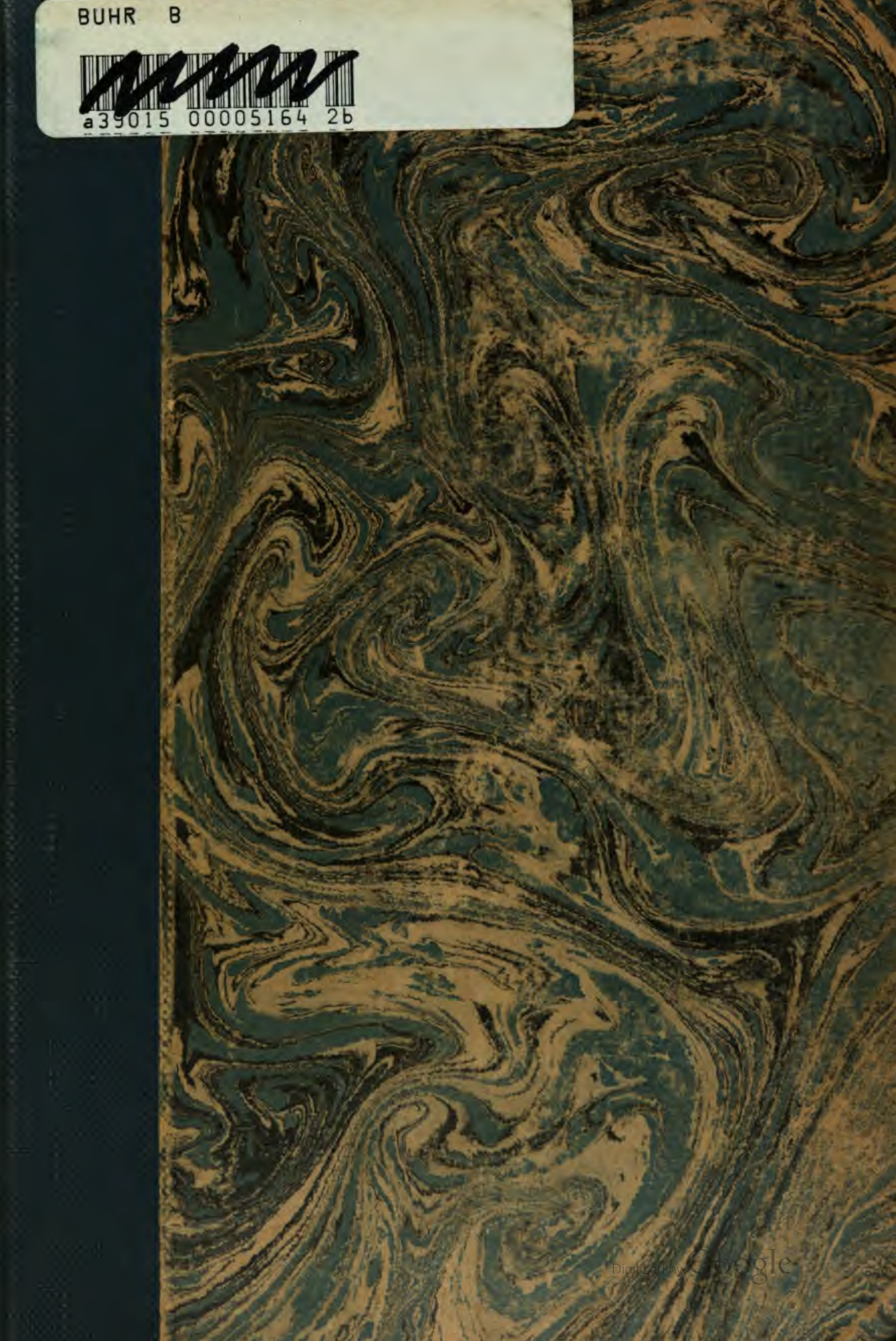
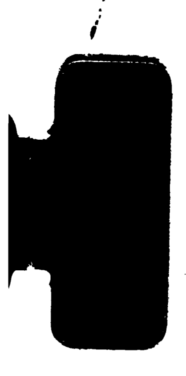
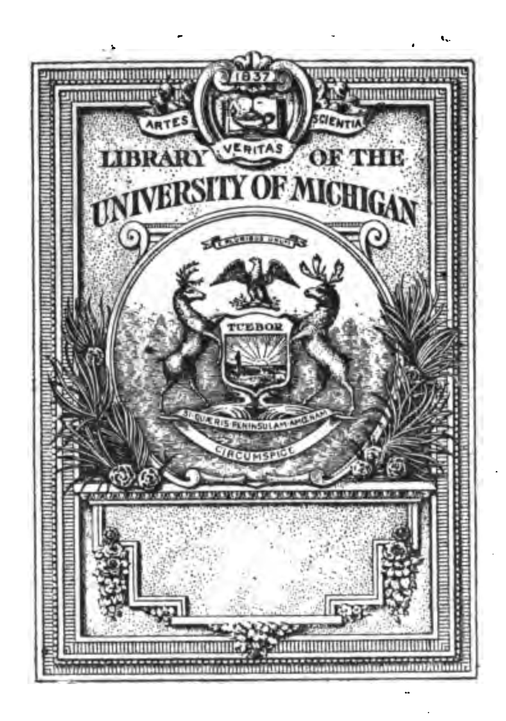










1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE



DIE ELEKTRIZITÄT IN DER ZELLE

VON

RUDOLF KELLER



WIEN UND LEIPZIG
WILHELM BRAUMÜLLER
K. K. UNIVERSITÄTS-VERLAGSBUCHHANDLUNG
GESELLSCHAFT M. B. H.
1918

Druck von Heinr. Mercy Sohn in Prag.

INHALTS-VERZEICHNIS.

Versuche an Pflanzen.

EINLEITUNG.

Das Problem, das ich zu bearbeiten unternommen habe, beschäftigt seit Langem die Physiologie der Pflanzen sowohl wie der Tiere. Die Entwicklung der letzten Jahrzehnte hat bewirkt, daß Ideen, die zu Ende der Neunziger Jahre paradox erschienen, mehr und mehr selbstverständlich werden. Wenn heute Einer behauptet, daß die Elektrizität sicher eine der wirksamsten Zellkräfte ist, so wird er kaum grundsätzlichem Widerspruch begegnen. Das Problem liegt zurzeit so, daß man sich bemüht, die Methode der physikalischen Chemie einfach auf die Zellchemie zu übertragen, wobei auch einige Erfolge erzielt worden sind. Ich meine aber doch, daß bei der Anwendung der anorganischen Physik auf die organische Zelle einige Unterscheidungen wesentlicher Natur gemacht werden müssen, die der besonderen räumlichen Energieverteilung der lebenden Zelle entsprechen.

Als dringendste Aufgabe der physikalischen Zellchemie erscheint mir zunächst eine Erforschung der Elektrizitätsverteilung in der lebenden Zelle, eine Art Z e l l e l e k t r o h i s t o l o g i e. Wenn einmal dieses Fundament geschaffen wäre, so würde vieles Andere sich von selber ergeben. Wir benötigen also vor allem eine Methode des mikroskopischen Elektrizitätsnachweises an lebenden Zellen. Meine jahrelangen, immer wieder unterbrochenen Versuche in dieser Richtung haben noch keine fertige Methode ergeben, aber doch schon Einiges geliefert, das in den Händen besser unterrichteter und geschickterer Experimentatoren sich zu einer zuverlässigen Untersuchungsmethode entwickeln wird.

In der Hauptsache beruht mein Verfahren auf dem Gedanken, daß die bisherigen Lebendfärbungen von Schnitten von den

elektrischen Ladungen der Zellen stark beeinflußt sind, und daß es durch Kontrollversuche mit entsprechend gewählten Anionen und Kationen gelingen muß, die elektrischen Ursachen der Lebendfärbung von den chemischen herauszuheben.

Im Verlauf meiner Untersuchungen hat sich ergeben, daß bei den üblichen Methoden der Lebendfärbung die elektrische Ursache zumeist die auffallendste ist, daß sie auch die älteren rein chemisch oder optisch gedachten Färbungen stark beeinflußt, und daß gewisse Methoden, z. B. Unnas Methode der Sauerstofffärbung eine reine Anodenfärbung zu sein scheint, oder Mac Callums Kaliumreagens eine reine Kathodenfärbung.

Auch in einigen sonstigen Belangen haben sich meine Anschauungen von den herrschenden Meinungen im Verlauf der Jahre etwas entfernt. Ich sehe mich deshalb gezwungen, meinen Untersuchungen einige theoretische Erörterungen voranzuschicken. Diese Ueberlegungen werden hoffentlich nicht alle Leser abschrecken, sich mit meinen Ideen zu beschäftigen. Ich bin mir bewußt, daß ich manches Unrichtige und manches Unbewiesene behaupte, aber ich bin dessenungeachtet ganz sicher, daß in meinen Darlegungen und Experimenten Vieles enthalten ist, was von Bedeutung ist und bisher übersehen wurde. In einigen Jahren wird es nicht mehr möglich sein, die Elektrizitätsladungen in lebenden Zellen als eine Art von Separatgebiet für Spezialisten zu betrachten, sondern man wird auch bei rein chemischen Untersuchungen auf diese Fundamentaltatsachen Rücksicht nehmen müssen.

REIBUNGSELEKTRIZITÄT UND GALVANISCHE ELEKTRIZITÄT.

Ueber diesen Gegensatz, der in dieser Schrift öfters hervorgehoben wird, habe ich in den „Elektrostatischen Zellkräften", Prag 1912, Einiges gesagt, was ich vorerst an dieser Stelle wiederholen will, weil darin Ueberlegungen enthalten sind, auf die es mir sehr ankommt.

Als ein Hauptfehler der modernen Elektrophysiologie erscheint mir die gewohnheitsmäßige Vernachlässigung des Unterschiedes zwischen statischer (Reibungs-) und galvanischer (Strom-)Elektrizität. Diese Verwechslung zweier in ihren Erscheinungen grundverschiedener, durch ein gemeinsames Wort verbundener Kräfte ist nicht nur nicht zeitgemäß, sondern ein direkter Rückschritt gegen die Methode des klassischen Elektrophysiologen Dubois-Reymond, der vor fast siebzig Jahren in seinem grundlegenden Buche die „statische" Elektrizität von der „galvanischen" scharf unterschieden hat und der auch versucht hat, mit einem statischen Elektroskop die tierische Elektrizität zu bestimmen — naturgemäß ganz vergeblich. Die damaligen Elektroskope waren gegen die heutigen etwa hunderttausendmal so grob. Später ist über elektrostatische Meßversuche physiologischer Elektrizität wenig mehr bekannt geworden.

Die Behauptung, daß die statische Elektrizität der strömenden Elektrizität nur durch ein Wort verbunden ist, wird Manchem paradox erscheinen, ist aber keine Uebertreibung. Mit demselben Recht, mit dem man diese beiden Energiearten aus historisch-linguistischen Gründen gewohnheitsmäßig mit einem gemeinsamen Wort bezeichnet, sogar mit mehr Recht könnte man elektromagnetische und Lichtwellen mit demselben Namen bezeich-

nen, oder Licht- und Wärmewellen. Der Unterschied zwischen Licht- und Wärmewellen ist ein so minimaler — der Bruchteil eines Millimeters Wellenlänge, der Unterschied zwischen elektrischen und Wärmewellen ebenso minimal, während der Unterschied zwischen ruhender und bewegter Elektrizität den Charakter einer Fundamentalverschiedenheit, den Charakter einer Dimension hat, und zwar ist diese Dimension die Geschwindigkeit von 300.000 km pro Sekunde, praktisch eine Zahl von unendlicher Größe. Statische Elektrizität ist von galvanischer ebenso verschieden, wie Ruhe von Bewegung, wie latente von kinetischer Energie.

Die moderne Physik, die eine starke Tendenz in sich trägt, die Energiearten auf eine einzige zurückzuführen, hat in den letzten Jahren wohl auch an die Unterscheidung zwischen Ruhe und Bewegung mehr und mehr gerüttelt. Unter der Führung des Physikers A. Einstein, der 1905 in den „Annalen der Physik" (17. Bd. p. 891) seine „Elektrodynamik bewegter Körper" veröffentlichte, in der er das von ihm so benannte „Relativitätsprinzip" aufstellte, ist eine große Partei unter den Physikern und Mathematikern entstanden, die der Zeit gleichsam den Charakter einer vierten Raumdimension zuschreibt. Ein Nebenergebnis dieser Anschauung von der relativen Bedeutung der Zeit ist, daß die kinetische Energie ihre Bedeutung als besondere Energieart verlieren soll, indem auch die Trägheit auf Energie zurückgeführt wird.

Diese geistvollen Ueberlegungen dürfen aber niemanden daran irre machen, daß die Biologie die scharfe Unterscheidung zwischen ruhender und bewegter Energie mehr als jemals nötig hat, weil sie die Erscheinungsformen, unter denen die beiden Energiearten in lebenden Wesen vorkommen, studiert und nicht ihre Ursachen, und weil die Erscheinungsformen jedenfalls von einander so verschieden sind, daß sie gesondert behandelt werden müssen. Die Unvollkommenheit unseres Denk- und Sprachsystems verurteilt uns überhaupt oft dazu, bewußt ungenaue Bezeichnungen anzuwenden und es ist nicht möglich, daß man allen unscharfen Formulierungen ganz ausweicht. Um auf den Punkt zu gelangen, auf dem Einstein, Planck und der so früh verstorbene Minkowski die Verschiedenheiten der Energie auf eine einzige zurückführen wollen, muß man erst die

klassische Elektrodynamik von Maxwell-Hertz und die spätere Dynamik von Thomson-Lorentz überwunden haben. Zumindest müssen die Verschiedenheiten der Energien Einem ganz klar vor Augen stehen.

Es ist manchmal unmöglich, immer aber fehlerhaft, wenn man versucht, mit denselben Meßapparaten galvanische und statische Elektrizität zu messen, während es für Licht-, Wärme- und Elektrizitätswellen gleichartige Meßapparate gibt, die sich nur quantitativ, nicht qualitativ unterscheiden. Es sind das Tatsachen, die wohl auch den Physiologen mehr oder weniger bekannt sein dürften, die jedoch nicht verhindert haben, daß man in den Schriften der Physiologen, selbst der speziellen Elektrophysiologen, Ueberlegungen und Ausdrücken begegnet, die diese fundamentale Unterscheidung ganz verkennen; die meisten aber sind sich bei ihren Experimenten überhaupt nicht dessen bewußt, daß die statische Elektrizität eine Energieart für sich ist, die sich erst transformieren muß, bevor sie als galvanische Elektrizität nachweisbar wird. Ferner hat die statische Messung den Vorzug, daß sie absolute Potentiale (gegen Null der Erde) gegenüber einem objektiven Wert ergibt, nicht relative Niveauunterschiede gegen andere normalerweise dagegen isolierte Teile desselben Präparates wie die Strommesser.

Die meisten Menschen sind gewohnt, mit der Sprache zu denken und Wortzusammenhänge mit Begriffszusammenhängen zu verwechseln. Selbst die reinen Physiker sind mitschuldig an diesem geläufigen Irrtum, weil auch sie oft aus Gründen des historischen Zusammenhanges die Verwechslung begünstigen. Für die reine Physik ist es aber ein Vorteil, wenn immer mehr Energien sich auf eine einzige — Ätherbewegung oder Elektronenbewegung — zurückführen lassen, und man hat in jüngster Zeit selbst die Gravitation den elektrischen Kräften zuordnen zu müssen geglaubt, so zwar, daß alle Energiearten nur mehr verschieden orientierte Bewegungen derselben Grundenergie zu sein hätten. Für die Physik sind solche Untersuchungen neue wertvolle Aufhellungen der Tatsachen, für die Physiologie aber würde man die Untersuchung nur verdunkeln, wenn man eines Tages versuchen wollte, die hellen und dunklen Wärmewellen durch ein gemeinsames Wort zu bezeichnen und nur mehr die Wellenlängen als unterscheidende Merkmale gelten zu lassen.

Ich glaube nicht, daß man selbst in wohleingerichteten Laboratorien statischen Elektrometern begegnen wird, obzwar diese die naturgemäßen Meßapparate für elektrische Potentiale an biologischen Präparaten darstellen. In den letzten Jahren benützt man wohl wieder Kondensator-Entladungen zur Reizung physiologischer Objekte, läßt aber die statischen Meßapparate mit wenigen Ausnahmen unbeachtet. Es ist gelegentlich schon früher von Physiologen hervorgehoben worden, daß die Art, in der die Potentialdifferenzen an Präparaten bestimmt werden, ganz künstliche, naturwidrige Verhältnisse schafft. Man nimmt ein Nerv- oder Muskelpräparat, versieht dies in vielen Fällen noch mit einem künstlichen Querschnitt, legt dann sogenannte unpolarisierbare Elektroden an und leitet nunmehr metallisch ab, gewöhnlich auf einem Wege, den man elektrotechnisch als Kurzschluß bezeichnen müßte, wenn die Potentialdifferenz des Präparates nicht zu klein wäre. Jedenfalls aber ist der Widerstand des äußeren Stromkreises sehr viel kleiner als der Widerstand, den der sogenannte physiologische Strom im inneren normalen Gewebe zu überwinden hat, wobei es, selbst für den Anhänger eines extremen Elektrochemismus, höchst fraglich bleibt, ob zwischen Geweben, die durch Membranen getrennt sind, etwas besteht, was man mit einiger Berechtigung als einen geschlossenen galvanischen Strom bezeichnen könnte. Diese Bedenken sind schon früher von Anderen geäußert worden. Ferner müssen an den Berührungsstellen zwischen Präparat und Elektrode physikalische Polarisationen und physiologische Entartungs-, Vergiftungs- und Absterbeerscheinungen entstehen, wie sie ebenfalls von Physiologen schon entdeckt und beschrieben wurden. Die Polarisation hat man durch die sogenannten unpolarisierbaren Elektroden beseitigen wollen, damit aber nur erreicht, daß die Polarisation von den Berührungsflächen Präparat-Salzlösung an die Grenzflächen Salzlösung-Elektrode verschoben wurde.

Alle diese oft beklagten Uebelstände ließen sich vermeiden, wenn man elektrostatische Meßmethoden ausarbeiten würde, für die die Grundlagen zurzeit in den verschiedenen Q u a d r a n t e n - E l e k t r o m e t e r n längst vorhanden sind. Man erreicht dadurch, daß man mit Apparaten mißt, welche in vielen Fällen die einzig möglichen für die betreffende Energiegattung sind, man erreicht dadurch in allen Fällen, daß man unter vollkommen

normalen Lebensbedingungen arbeiten kann. Denn das Elektrometer braucht das Präparat überhaupt nicht zu berühren, sondern kann durch bloße Annäherung (durch Influenz) wirken und es erzeugt, auch wenn es direkt an ein flüssiges oder kolloides Präparat angelegt wird, keine Kreisschluß-Polarisation. Schließlich kann man mit zwei Elektrometern von zwei korrespondierenden Stellen eines Präparates gleichzeitig ableiten, ohne daß man dadurch einen äußeren Schließungskreis herbeizuführen gezwungen ist.

Eine Größe, die bei physiologischen Versuchen gewöhnlich ganz vernachlässigt wird, ist die Kapazität. In der Technik wird von der Kapazität nur bei elektrostatischen Messungen gesprochen, es gibt jedoch auch eine elektromagnetische Kapazität, die namentlich in der Telephontechnik von großer Wichtigkeit ist. Selbst wenn man die physiologischen Elektrizitätsprobleme wie bisher als reine Stromprobleme auffaßt — sie sind wahrscheinlich Kombinationen aller uns bekannten Energiearten in einer höheren Verknüpfungsform, wie sie im physikalischen Laboratorium noch nicht existiert — so hätte man bei Messungen ungefähre Feststellungen über Kapazität der Präparate und der Meßapparate nicht unterlassen sollen. Diese rohen Feststellungen hätten genügt, um die Widersprüche der gegenwärtigen Messungen und Kurvenaufschreibungen auffallend zu machen und einige der gröbsten Fehler zu vermeiden. In kaum einem Teil der Physiologie finden sich so viele und so große Differenzen in den Untersuchungszahlen wie in der Elektro-Physiologie. Ganz sicher aber sind die elektrischen Konstanten jedes Organismus ebenso fest umrissene arteigene Maßzahlen wie Temperatur, osmotischer Druck der Gewebsflüssigkeiten, Lichtbrechungsvermögen, Leitfähigkeit, die ziemlich scharf übereinstimmen oder unter gewissen physiologischen Zuständen sich in gleicher Weise verändern. Diese Differenzen kommen sicher in erster Reihe davon, daß man in allen Fällen die Kapazität von Objekt und Meßapparat ganz außer Betracht ließ.

Bei dieser Gelegenheit sei erwähnt, daß das Quadrantenelektrometer eine sehr kleine Kapazität hat und daß diese Kleinheit es ermöglichen würde, auch mikroskopische Objekte zu untersuchen, wobei allerdings am Elektrometer und vielleicht auch am Mikroskop einige Adaptierungen notwendig wären. Das Kapillar-Elek-

trometer der Physiologen dagegen hat eine vergleichsweise sehr große Kapazität.

In der Physiologie wird das Bild des elektrischen Stromes am liebsten durch die Analogie des Flüssigkeitsstromes versinnbildlicht. In diesem Bilde gesprochen, liegt der Grundfehler der physiologischen Elektrizitätsmessungsmethoden etwa in folgendem: Der elektrische Strom der organischen Gewebe ist, wenn er überhaupt vorhanden ist, ein haardünner Strahl oder ein Tropfenfall, von dem man die sekundliche Ausflußmenge (Stromstärke) und die elektromotorische Kraft (Fallhöhe) messen will. Man benützt dazu ein Hektolitermaß! Dieses Hektolitermaß hat so feine Teilstriche und eine Fernrohr- oder Projektionseinrichtung, daß eine sehr kleine Veränderung des Niveaus dem Beobachter trotzdem sichtbar wird. Er kann also möglicherweise die Stromstärke schätzen. Zu alledem hat das Hektolitergefäß der Physiologen die Eigenschaft, die äußere Strombahn erst zu schaffen, ohne die selbst der haardünne Flüssigkeitsstrahl überhaupt nicht erscheinen kann. Es handelt sich also nach dieser Messungsmethode möglicherweise nicht einmal um einen Tropfenfall, sondern ganz oder teilweise um einen latenten Wasserdruck, der erst durch die Einbringung des Maßgefäßes oder vielmehr seiner Zuleitung künstlich zu einem Stromfaden gemacht wird.

KERN UND PLASMA.

Das Problem der Zellelektrizität beschäftigt mich mit Unterbrechungen seit vielen Jahren. Meine erste Arbeit erschien 1897. Da ich mich gleich damals in die Idee verbissen hatte, daß die Tinktionen der Histologen in zahlreichen Fällen die verschiedene Verteilung der Elektrizitäten wiedergeben, erschien mir natürlich immer der Kern, als Ganzes genommen, als Kathode, erstens wegen seiner vorwiegenden Affinität für Basenfarbstoffe, zweitens wegen des Umstandes, daß Querschnitte, die überwiegend Kerne anschneiden, makroskopisch immer elektronegativ befunden wurden, wie überhaupt, gewisse Zellen ausgenommen, das Zellinnere lebender Organismen bei Pflanzen und Tieren fast immer negativ befunden wurde.

An dieser Stelle muß, wie schon so oft, hervorgehoben werden, daß die gewöhnlich infolge eines Irrtums aus historischen

Gründen negativ genannte Elektrizitätsart in Wahrheit die positive ist. Das, was wir gewohnt sind, als positive Elektrizität zu betrachten, ist in Wahrheit ein Minus an negativer Elektrizität. Es schien ganz gut zu stimmen, daß der Kern der Zelle während des Lebens der Träger wahrer Elektrizität sein mußte. Indessen, wenn man das System für die einzelnen Zellsorten der höheren Tiere verfolgte, die experimentellen Befunde mit der physiologischen Arbeit verglich, so gab es immer Unstimmigkeiten. Es wurde mir bald klar, daß das Problem wie so viele andere nicht gerade einfach lag.

Um nur Eines hervorzuheben: eine Umkehrung der Zellpolarität, wie sie bei dem elektrischen Akkumulatoren- oder Kondensator-System jeden Augenblick eintreten mußte, wenn die ladende Elektrizitätsquelle schwächer wurde oder ganz versagte, war bei gewissen Zellarten (namentlich bei den Nerven und Ganglien, aber auch beim Epithel der Tubuli contorti der Nieren, beim Darmepithel) physiologisch undenkbar. Aus diesem Dilemma befreite mich Heidenhains großes, an dieser Stelle so oft zitiertes Werk über Plasma und Zelle.

Nach Heidenhain ist der Kern kein einfaches physiologisches Stoffwechselorgan der Zelle, sondern ein Zentrum, das vornehmlich zur Erhaltung der arteigenen Zellart bestimmt und dafür spezialisiert ist, also für den Ablauf der werktäglichen Zellfunktionen nur sekundäre Bedeutung, vielleicht als letzte Energiereserve oder dergleichen hat. Ihre Hauptaufgabe ist aber die Erhaltung der Art durch Wachstums-Anregung, durch Zellteilung, durch Reparierung vorkommender äußerer oder innerer Schädigungen.

Konsequenterweise erscheint mir auch bei den elektrostatisch so hochinteressanten Nervenzellen die Idee Heidenhains, daß das sich basophil mit Kernfarbstoffen färbende Tigroid der Nervenzellen vertretungsweise (d. h. während des gewöhnlichen Stoffwechsels) den Kern in jenen Funktionen repräsentiert, die nicht die Mitose oder sonstige rein generative Vorgänge betreffen. Vom elektrostatischen Standpunkte wäre nur zu wünschen, daß die Tigroidmassen, wenn sie die Gegenpole der Achsenfibrillen-Schleifen sind, sich etwas runder und weniger eckig repräsentieren, als sie in den histologischen Atlanten erscheinen.

Daß sich beim Ablauf von Ladungen die Tigroidsubstanzen verbrauchen, daß sie vielleicht nichts anderes zu tun haben, als den Energiebedarf dieser Entladungen zu liefern, würde mit dieser Annahme gut vereinbarlich sein.

Im weiteren Verfolg seines Gedankens über die Rolle von Kern, Tigroidsubstanz und Achsenfasern hat Heidenhain auch das Leitungselement der Nerven treffend dahin charakterisiert, daß er sagte: „Unser Endresultat wäre also, daß in der Achsenfaser ausschließlich die Träger der nervösen Leitung sind." Hier hat man sich nur von dem Bilde zu befreien, das trotz aller schon bekannten physiologischen Einwände noch immer ein Unterbewußtsein mitspielt, daß nämlich der „Kernleiter" ein besserer (oder wie Heidenhain in solchen Fällen sagen würde: ein dichterer) Leiter der Elektrizität ist.

Ja, die Achsenfasern sind unbezweifelbar die Träger der „nervösen Leitung", aber diese Leitung ist eben eine eigenartige nervöse, keine elektrische Drahtleitung, eher eine Kombination von drahtloser Wellentelegrapie mit Kanalstrahlen oder Kathodenstrahlen, jedenfalls aber eine Elektrizitäts-Uebermittlung, die an sogenannte Nichtleiter geknüpft ist, nicht an Leiter erster oder zweiter Klasse für Elektrizität!

Mein an anderer Stelle geschildertes Berlinerblau-Verfahren ist leider noch zu grob, und meine Kenntnis der Kernhistologie zu oberflächlich, als daß ich neue sichere Experimente zur Kernladung gewöhnlicher negativer Zellen beibringen könnte. Ich kann nur die älteren Tinktionen auf Grund der jetzt gewonnenen neuen Erkenntnisse nach ihrer wahrscheinlichen Elektrizitätsladung durchmustern und gelange dabei zu einigen allgemeinen Folgerungen:

Die naheliegendste Idee, die Einem bei der Betrachtung der gegensätzlichen Färbung von Kern und Zellprotoplasma im allgemeinen aufsteigt, ist die einer elektrischen Ladung zwischen Kern und Zelleib. Zusammen mit der negativen Ladung des Zellquerschnittes gegen die Oberfläche, der sich bei allen elektrophysiologischen Experimenten unter freiem Auge ergeben hat, mußte man erwarten, daß in Uebereinstimmung mit der scheinbaren Affinität des Kerns für basische Farbstoffe die Kernmembran gegenüber dem Zelleib eine Kathode darstellt. Damit stimmte es nun gar nicht, daß der lebende unbeschädigte Zellkern

nicht zur Annahme der vitalen Farbstoffe gebracht werden kann. Es sind nur einige ganz wenige Ausnahmsfälle bekannt geworden, in welchen lebende normale Zellkerne Farbstoff angenommen haben. Dagegen färbt sich der getötete (fixierte) Kern sehr leicht und sehr stark mit basischen Stoffen.

Im Hinblick auf unsere Nebenannahme, daß die Zelle als natürlicher Akkumulator sich wahrscheinlich nach Aufhören der normalen Assimilations-Energie-Aufsammlung in der entgegengesetzten Richtung ihre Aufladung entladen muß, war nun gerade die Basizität der Kernfärbung unerwünscht. Es sprach also die Nichtfärbung im Leben und die Kathodennatur nach der Fixierung gegen die Kathodennatur im Leben. Dies war theoretisch die Hauptschwierigkeit der Stoffwechsel-Zellen.

Bei gewissen Zellen, den Ganglien z. B., mußte aus zwingenden physiologischen Gründen eine anodische Polarisation in der Gegend des Ganglienkerns vermutet werden, wenn das ganze System als Kondensator die starke Kathodizität der Nervenachsenfasern bewahren sollte. Damit stimmt die Beobachtung der Histologen überein, daß die Ganglienkerne (ebenso wie die der Eizelle) anders als alle andern Kerne chromatinarm sind.

In fast allen vorliegenden Untersuchungen aber wurden der Kern der Ganglienzelle und die Granula in der Gegend des Zellkerns, die Nissl-Körper als basophil, also als kathodisch angesprochen und färbten sich mit den gewöhnlichen Kernfarbstoffen. In Mischungen von Säure- und Basenfarben in der Biondischen Mischung und in Ehrlichs Triazid gab sich wohl eine gewisse relative Azidophilie der Nissl-Körper und des sogenannten Oxychromatins des Kerns zu erkennen, indem diese Zellteile den sauren Farbstoff auswählten, allein diese befriedigte mich nicht, da sie erst nach der Fixation hervortrat, gewöhnlich auch erst nach saurer Fixation, also ebensowenig beweisend war für meine Gedanken wie die Basophilie des nicht mehr lebenden Kerns.

Sehr viele seither aufgedeckter Erscheinungen führten zu der heute von vielen Histologen geteilten Anschauung M. Heidenhains, daß der Zellkern der Stoffwechselgewebe nicht in jenem polaren Gegensatz und Austauschverhältnis zum Zelleib steht, der ihm bis in die Neunziger Jahre ziemlich allgemein zugeschrieben wurde. Man findet gegenwärtig, daß die

nackten Tatsachen, wie schon erwähnt, nur eine sehr geringe Beteiligung des Kerns am vegetativen Leben der Zelle erkennen lassen. Bis jetzt hat sich experimentell nur erkennen lassen, daß beim Wachstum, bei der Reparation von Schädigungen, vor allem aber bei der Zellteilung der Kern als Hauptfaktor mitwirkt, bei den Stoffwechsel-Vorgängen jedoch haben die ausdauerndste Arbeit und die subtilsten Untersuchungsmethoden bisher nicht das geringste Positive ergeben. Der Kern lebt, wenn nicht gerade generative Vorgänge eintreten, eine Art Leben abseits von dem Zelleib, durch seine geschlossene Membran alle Einflüsse des Leibes abwehrend.

Auf Grund dieser Vorstellung ließ sich das paradoxe Verhalten des Zellkerns bei elektrischen Lebendfärbungen leichter verstehen. Die dünne Membram allein aber konnte noch immer keine vollständige elektrische Isolierung des Kerns herbeiführen, denn die statische Kathode, als welche mir der Kern der Stoffwechsel-Zelle immer noch aus zwingenden Gründen erscheinen mußte, hätte durch bloße Influenzwirkung die unschädlichen basischen Farbstoffe wenigstens auf der Kernmembran niederschlagen müssen.

Aus allen diesen Gründen hatte sich bei mir die Annahme herausgebildet, daß um den Kern herum, in vielen Fällen um die ganze Zelle eine Art entgegengesetzte Kolloidschutzladung sitzen müsse, die beispielsweise einen sonst elektronegativ ausfärbenden Farbstoff verhindert, zur Kathode zu wandern, sondern ihn solange abstößt, bis seine charakteristische Lebensladung erschöpft ist. Auf diese Weise suchte ich den Widerspruch zu beseitigen, daß Annahme und Experiment nicht stimmen wollten. Es kam hinzu, daß auch die Grundannahmen des Kondensators als elektrische Konstruktion der lebenden Zelle nach Ladungen von flächenhafter Anordnung verlangte, die am naheliegendsten durch Kugelschalen entgegengesetzter Potentiale mit einer Isoliersubstanz dazwischen Gestalt annehmen mußten. Leider nur hatte bis dahin in vielen Tausenden Bildern kein einziger Histologe solche Strukturen abgebildet oder beschrieben. Ich konnte mich also kaum einer Täuschung darüber hingeben, daß man diese Idee niemals akzeptieren würde, etwa mit der Begründung, meine Elektrizitätskugelschalen seien so fein, daß sie unter der Sichtbarkeitsgrenze unserer Mikroskope liegen.

In diesem Dilemma war Unnas Entdeckung der Oxydations- und Reduktionsorte für mich eine wahre Erlösung. Unna, der in seinen Schriften niemals das Wort Elektrizität gebraucht, der überhaupt nicht darauf ausging, bestimmte theoretische Ideen zu beweisen, sondern ganz objektiv beschreibt und abbildet, was er mit seinen neuen geistvollen Methoden beobachtet, hat nicht nur eine Kugelschale herausgefärbt, sondern in den Purkinjeschen Zellen des Kleinhirns gleich sechs hintereinander geschaltete Kugelflächen abgebildet.

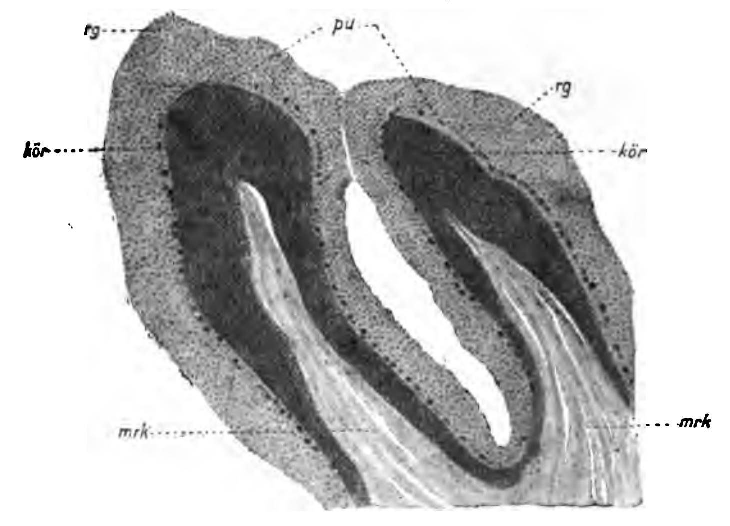


Fig. 1. Kleinhirn vom Kalb „Uebersichtsbild".

Vorerst ein Wort über Unnas Methode. Der Hamburger Histologe, dem wir so wertvolle Tinktionsmittel verdanken, hat tierische Gewebe frisch und lebend vereist und hat die Gefrierschnitte unter Luftabschluß mit reduziertem farblosen Methylenblau (Leukomethylenblau, Rongalitweiß) behandelt, um an den blau werdenden Punkten jene Orte des Gewebes aufzufinden, die Sauerstoff produzieren oder aufbewahren.

Auf diese Weise erhielt er seine sogenannten Sauerstofforte. Dann behandelte er dieselben Gewebsarten mit Permanganat um die Reduktionsorte auszufärben, also durch ein inverses Bild seine Oxydationszentren zu verifizieren. Nach den vorliegenden Bildern *) ist ihm dies auch in brillanter Weise gelungen. An

*) Die Sauerstofforte und Reduktionsorte von P. G. Unna. Arch. für mikrosk. Anatomie. Bd. 87. Abt. 1. 1915.

anderer Stelle dieser Schrift sind seine Nierenfärbungen und seine Blutzellenfärbungen ausführlicher besprochen, an dieser Stelle seien nur seine Nervenfärbungen hervorgehoben, die mit einem Schlage ein volles Licht in die widerspruchsvolle Elektropolarität der Ganglien gebracht und den größten Teil der Divergenzen zwischen Elektrostatik und Histochemie hinweggeräumt haben.

Im vorstehenden Uebersichtsbild vom Kleinhirn des Kalbes ist die aus markhaltigen Fasern bestehende weiße Schicht (mrk) nahezu ungefärbt. Sie wird zunächst umgeben von der dunkelblauen, aus kleinen Ganglien bestehenden Körnerschicht (Kör). Zwischen dieser und der äußeren hellblauen Schicht des Rindengraus (rg) schiebt sich eine ununterbrochene Reihe dunkelblau gefärbter großer Ganglien ein. Es sind die Purkinjesche Zellen (pu). Die Zonen der markhaltigen Nerven (mrk), — (die sich wieder als Reduktionsort mit Permanganat stark bräunen) — und die Ganglien kontrastieren also bei der Rongalitfärbung lebhaft, es sind die Reduktionsorte und Sauerstofforte des Zentralnervensystems (oder, elektrisch ausgedrückt: die Kathoden und Anoden des Kleinhirns).

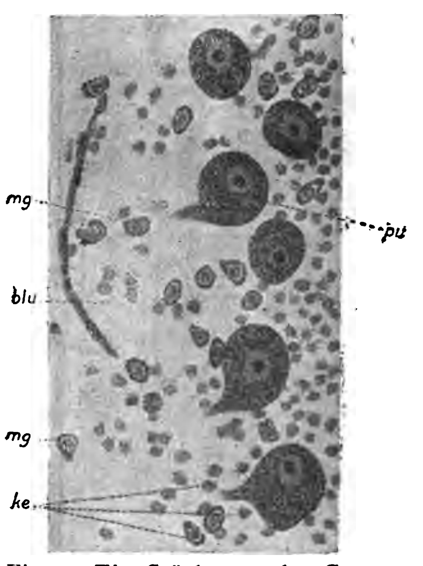


Fig. 2. Ein Stück von der Grenze der grauen Rinde und der Körnerschicht, stärker vergrößert.

Bei dieser stärkeren Vergrößerung lassen sich bereits ganz deutlich drei Kugelschalen entgegengesetzte Elektrizitäten in den großen Purkinjeschen Zellen erkennen, ferner zwei ausgefärbte Kugelschalen bei den kleineren Ganglien.

Die Tigroidmasse, die sogenannten **Nissl**-Körper, sind deutlich entgegengesetzt polarisiert wie die Fibrillen der Achsenfasern, also eine zweite Hauptforderung der elektrostatischen Kondensator-Konstruktion ist erfüllt. Die mittelgroßen Ganglien

(mg) zeigen einen hellblauen Kern zwischen dunkelblauen Kernkörperchen und einen Saum von dunkelblauem Granoplasma.

Dieses Bild zeigt bei der großen Purkinje-Schicht nicht weniger als sechs deutlich ausgefärbte Differenzierungs-Kugelschalen in einander angelegt, also eine flächenhafte Kondensator-Konstruktion von geradezu typischer Art mit dielektrischer Zwischenschichten zwischen sich. Von der Isolierfähigkeit dieser mikroskopisch dünnen Schichten kann man sich eine Vorstellung machen, wenn man sich überlegt, daß zur Aufrechterhaltung einer Scheidung zwischen einem Ort naszierenden Sauerstoffes und einem Reduktionsgewebe, das imstande ist, Methylenblau zu desoxydieren (das durch bloßen Luftzutritt sogleich wieder gierig sich reoxydiret), eine Spannungsdifferenz von der Größenordnung eines Volt, sicher bei Atmosphärendruck 2 Volt, erforderlich sein muß: Das hintereinander geschaltete Kondensator-System, das bei der erwähnten Vergrößerung erscheint, muß ungefähr 6 Volt Spannung während des Lebens aufrechterhalten, höchstwahrscheinlich aber viel mehr, weil 6 Volt im elektrostatischen Maß keine hohe Spannung sind. Es ist erstaunlich, wie viel die Tausendstel Millimeter dünnen Isolierungsschichten aushalten.

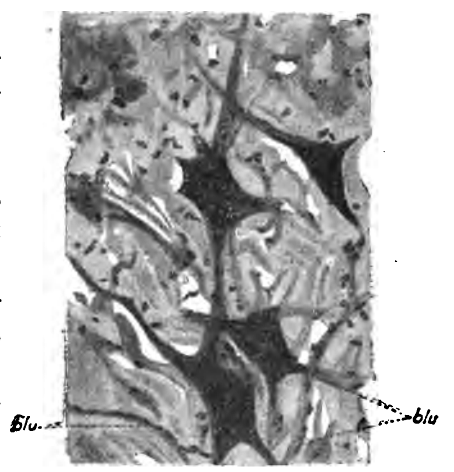


Fig. 3.

Natürlich habe ich mich bemüht, auch mit meinem Verfahren die elektrostatischen Kugeschalen um die Kerne aufzufinden. In den sicher über tausend tierischen und pflanzlichen Zellen, die ich elektrisch konträr ausfärbte, konnte ich jedoch nichts Sicheres über die Kernladungen feststellen. Meine Anodenbilder namentlich sind gegen Berührung des Deckgläschens so empfindlich, daß ich mit stärkeren Linsen nicht an sie herankonnte. Ich beschränkte mich also im gegenwärtigen Stadium auf schwache Vergrößerungen, bei denen die von mir beob-

achteten Gewebe keine gesetzmäßige Kernladung erkennen, ließen, geschweige denn, daß ich hätte dünne Potentialflächen um den Kern herauspräparieren können. Ich habe aber oft auf die Kernladung geachtet, ihre schwache, schwankende elektrische Polarität bei den vegetativen Zellen hat mich jedoch immer wieder enttäuscht.

DIE KONDENSATORSTRUKTUR DES LEBENDEN GEWEBES.

Wenn man die Bilder betrachtet, die teils aus Färbungen lebender Zellen, teils aus der Behandlung mit Kohlenemulsion und andern elektrisch geladenen Partikelchen, teils aus degenerierten oder fixierten tierischen Zellen stammen, so wird man im Zusammenhang mit zahlreichen physiologischen Tatsachen auf den Gedanken gebracht, daß die Zelle kondensatorische Einrichtungen enthält und daß gewisse Zellen, Nerven, Muskeln — insbesondere die quer gestreiften Muskeln — und die elektrischen Organe der Fische jene Zellen sind, bei denen die Kondensator-Natur sich spezialisiert hat. Die quer gestreiften Muskeln und die elektrischen Organe präsentieren sich als hintereinander geschaltete Kondensatoren, ob Nerven und glatte Muskeln parallel geschaltet sind, läßt sich zurzeit noch nicht beurteilen. (Schon der berühmte englische Physiker Oliver Lodge hat die Idee ausgesprochen, daß der Nerv ein Kondensator ist.)

Wenn es gelingen würde, auf dem Wege der Nachforschung nach dem Weg schnell wandernder kleiner Ionen die normalen Eintrittsstellen elektrischer Potentialgefälle experimentell zu erforschen und sie künstlich mit Elektrizität meßbar zu beladen, so würde sich ganz zweifellos ergeben, daß das lebende tierische Gewebe eine viel größere elektrostatische Kapazität besitzt als im fixierten Zustande und als seinen Dimensionen entspricht. Das lehrt schon der Augenschein, wenn man eine gewöhnliche Elektrisiermaschine in einen menschlichen Körper entlädt, obzwar dabei die eigentlichen lebenden Zellen ihre Zuleitungsstellen hinter guten Isolatoren abgedichtet haben. Es geht dabei eine erstaunliche Menge von Elektrizität in den Körper.

Einer der geläufigsten Irrtümer, die man in physiologischen, aber auch in physikalischen Handbüchern findet, ist die Meinung, daß lebende Körper Elektrizität leiten. In einem oberflächlichen Sinne in dieses Wortes buchstäblicher Bedeutung ist dies richtig, alle Körper — erst recht alle Schnitte — sind von einer mikroskopischen Feuchtigkeitsschicht bedeckt, die sie auf der Oberfläche leitend machen. Aber die lebende Zelle an sich ist zweifellos elektrisch ausgezeichnet isoliert. Das lehrt die einfachste Betrachtung der geläufigsten Tatsachen. Wie könnte ein Mensch es aushalten, konstante Ströme von 10 Volt und mehr durch seinen Körper fließen zu lassen, oder statische Entladungen von 1000 Volt und mehr, die chemisch das Unterste zu oberst in dem halbflüssigen Zellinhalt elektrolysieren müßten, wenn nicht die wirklich lebenden Zellen (die Epidermis ist als halbdegenerierte Zellen-Schicht zu betrachten) ganz zuverlässig gegen das Eindringen von Strömungen und Entladungen isoliert wären! Ist es ein bloßer Zufall, daß die Technik fast alle zuverlässigen Isolationsmittel: Harz, Kautschuk, Guttapercha, Seide, Fuchsschwanz, Lack, gewisse Öle aus der organischen Natur beziehen muß? Ist es ein Zufall, daß in der Baumrinde oder im Wiesenblumenstengel jede künstliche Wunde zuerst durch einen solchen aus der Wunde ausfließenden Stoff elektrisch isoliert wird?

Zu dieser Erkenntnis bin ich nicht auf dem Wege theoretischer Ueberzeugung gekommen, sondern durch jahrelang fortgesetzte vergebliche Versuche, die Wege der elektrischen Reizleitung in Pflanzen aufzudecken. Ich hatte die Absicht, wenn ich die natürlichen Stromwege gefunden hätte, oder auch ohne diese genau zu kennen, durch Einleitung künstlicher Ströme von außen die Zellen einmal negativ, einmal positiv zu laden und dann oder gleichzeitig mit Farbstoffen zu tingieren, um zu beweisen, daß die negative Färbung das Negativ der positiven ergeben würde, daß also in vielen Fällen die Elektrizitätsladungen, nicht die chemischen Zellbausteine die Färbung bewirken. Diese Versuche sind zumeist im ersten Anlauf mißglückt. Es ist, wie ich mich oft überzeugte, ganz unmöglich, jene niedrigen Spannungen, die die Zellen normal vertragen, künstlich irgendwie durch die natürlichen Isolationen hindurch, in das Innere der lebenden Zellen zu bringen.

Die Tierphysiologen werden einwenden, weshalb ich nicht die Nerven, die natürlichen Reizleiter, dazu benützt habe, wie es in der Elektrophysiologie üblich ist. (Aber die „Leitung" der Nerven und Muskeln bei elektrophysiologischen Versuchen hat wegen des großen Widerstandes der Achsenzylinder nur eine ganz äußerliche Ähnlichkeit mit dem, was gewöhnlich damit unausgesprochen verglichen wird: mit der Leitung eines Metalldrahtes). Ich habe natürlich auch das versucht, aber mit demselben Mißerfolg. Wer nach der alten Analogie der Telegraphendrähte die Nerven für „Leiter" oder für „Kernleiter" elektrischer Ströme hält, ist von einem Irrtum befangen, der in der Verwechslung von statischer mit galvanischer Elektrizität seinen Hauptursprung hat.

In Wirklichkeit hat sicher der Tierkörper (und wahrscheinlich auch die Elektrotechnik) keinen besseren Isolator als den Achsenzylinder des Nerven und die Idee, der Organismus hätte sich gerade ein elektrolytfreies Gewebe ohne Flüssigkeitsfaden (des Achsenzylinders, nicht des Nerven) als Leitungsbahn ausgesucht, ist ein ganz oberflächlicher Analogieschluß. Ein Blick auf Mac Callums Färbungen, der mittels Kobaltnitrit die Kaliumkonzentration aufsucht, auf Unnas Reduktionsfärbung mit Kaliumpermanganat, welches dieselben Orte differenziert, mit Unnas Oxydationsort-Reagens, die eine inverse Färbung erzeugt, ergibt etwa folgendes Bild: Anodische Orte lassen sich weder auf Querschnitten der Nerven noch auf Längsschnitten finden, sicher nicht im Axon, höchstens vielleicht in gewissen Punkten der Scheiden. Es sind daher diese Orte anscheinend frei von Sauerstoff in elektronegativem, zur Oxydation geeignetem Zustande, frei von Chlor und Säureanionen. Dagegen findet sich in den Scheiden, im Mark bei markhaltigen Nerven, unmittelbar anliegend an den Achsenzylinder Kalium in konzentrierter Form, sicher auch verwandte andere Kationen, die sich nicht so leicht mikrochemisch nachweisen lassen. Nach allen diesen Färbungen und im Zusammenhang mit den bekannten elektrischen Eigenschaften des normalen Nerven sieht es so aus, als ob der Nerv-Achsenzylinder, sich im Leben unter einer starken Spannung in der Richtung + (periphere Endung) — Ganglienzelle befindet, hinter der in der Ganglienzelle eine + Anode geschaltet ist, die durch Hintereinanderschaltung mit anderen Ganglienzellen in

Verbindung steht. Dieses Schema ergibt sich, wie erwähnt, aus den älteren experimentellen Tatsachen unter der sehr wahrscheinlichen Voraussetzung, daß Unna und Mac Callum nicht. wie sie glaubten, charakteristische chemische Stoffe, sondern positive und negative Elektrizitätspole ausgefärbt haben.

Aber dieses Schema stimmt leider gar nicht mit den einfachsten elektrochemischen Gesetzen. Man kann sich wohl vorstellen, daß z. B. unreines Wasser, das stundenlang zwischen gespannten Elektroden gehalten wird, seine letzten Ionen an die Elektroden verliert und dadurch ein Dielektrikum (ein elektrostatischer Isolator) wird, man kann sich ebenso vorstellen, daß der Nerv-Achsenzylinder zwischen den Polen (Ganglien-Innenschaltung) und peripherer Nervenendigung von allen positiven und negativen Ionen befreit und freigehalten wird, aber es ist nicht verständlich, daß bei elektrophysiologischen Galvanometer-Versuchen der periphere Abschnitt des Nerven stets positiv gefunden wird gegen den zentralen, während nach dem Schema der Färbungen eher das Gegenteil der Fall sein müßte.

Auch ist es unerklärlich, daß wenn die elektrophysiologischen Feststellungen unrichtig wären, wegen einer Umkehrung des Normalpotentialgefälles nach Durchschneiden oder nach Verletzungen, daß sich in diesem Fall das Kalium an der Grenzschicht des Achsenzylinders anreichert, wie es Mac Callums Bilder zeigen. Wenn das zentrale Ende des Nerven kathodisch ist gegen das periphere, so ist es vollkommen unmöglich, daß das Kalium nicht in den Achsenzylinder eindringt und ihn gegen das Zentralnervensystem hin durchwandert. Die Biochemiker sagen in einem solchen Fall, seine Lipoidhaut ist nach einer Richtung für gewisse Ionen nicht durchdringbar — semipermeabel — aber diese Erklärung ist keine Erklärung. Es gibt keine Plasmahaut, wenn sie nicht direkt aus Glas oder Kautschuk ist, die imstande wäre, Kaliumionen von einem halbflüssigen Substrat, das elektronegativ gegen seine Umgebung geladen ist, abzuhalten. Hier ist etwas, was allen Deutungsversuchen auf Grund der heutigen Erfahrungswelt widerspricht. Vielleicht liegt hier eine Kombination oder Konstruktion vor, die die Menschen erst einmal nacherfinden oder nachentdecken müssen, bevor sie sie verstehen können.

Eine andere Möglichkeit, die Schwierigkeit zu überbrücken, liegt vielleicht in folgender Überlegung: Wie alle Gewebe dieser Art, muß der Nerv zwei Hauptrichtungen der elektrischen Potential-Ausgleiche haben, die assimilatorische während der Verarbeitung der Nahrungsstoffe und die entgegengesetzte dissimilatorische, wenn ein Impuls die Nervenbahn durcheilt, oder wenn durch Aufhören der Atmung oder des Kreislaufes die aufladende (akkumulatorische) Stromrichtung umgekehrt wird. (S. Kap. „Gerichtete chemische Kräfte.“)

Aber auch dagegen gibt es Einwände, die die Unstimmigkeit aufs Neue hervorrufen. Es ist hier ein Punkt, der nicht nur bei den Nerven, sondern in allen tierischen und pflanzlichen Geweben wiederkehrt, daß nämlich direkte Kathoden zuweilen Anoden zu sein scheinen, oder daß ihre Differenzierung in einem Maße jenseits der Sichtbarkeitsgrenze der Mikroskope sich verbergen muß, die aus zwingenden Gründen unwahrscheinlich ist.

Beispielsweise versteht es sich sehr leicht, daß eine lebende Pflanzenwurzel, die ich als elektrostatische Anode anspreche, die Phosphorsäure-Ionen aus zwei Meter entfernten Erdstückchen ansaugt, wie aber zieht sie das Kalium und den Kalk und das Eisen an sich, das sie ja ebenfalls aus der größten Verdünnung an sich zieht? Oder umgekehrt ist es sehr leicht verständlich, daß die alkalischen Darmdrüsen Natrium kathodisch aus den Ingesta in die Säfte absaugen, wie tun sie dies aber gleichzeitig mit Chlorionen, die ebenfalls unzweifelhaft das Darmlumen mit den Natriumionen zusammen verlassen? (Wenn auch sicher nicht in äquivalenten Mengen, wie die Biochemiker als selbstverständlich annehmen, ohne sich jemals experimentell vom Gegenteil zu überzeugen.)

Ueber diese Schwierigkeit habe ich sehr viel nachgedacht, ohne eine befriedigende Erklärung auf Grund der gegenwärtigen Experimental-Molekularphysik finden zu können. Schließlich ist anzunehmen, daß jede neue Auffassung ihre neuen Schwierigkeiten mit sich bringt und zu hoffen, daß die raschen Fortschritte der neuen Elektronen-Physik vielleicht auch hier die Aufklärung bringen werden. Vielleicht gelten, ebenso wie für die Adsorption und verwandte Erscheinungen in den mikroskopischen Entfernungen der Zelltätigkeit, etwas veränderte Gesetze als für makroskopische Entfernungen, wie Mac Callum in seiner hier

so oft zitierten Arbeit mit Nachdruck hervorhebt. Dieser Autor möchte am liebsten so ziemlich alle unerklärten Lebenserscheinungen auf molekulare Oberflächenspannung zurückführen, so wie der Verfasser auf elektrische Ladungen.

Aber man könnte sich doch etwa vorstellen, daß eine Zellfläche, z. B. das Darmepithel, das kathodisch polarisiert ist, aber nach Art der Ladung nur auf mikroskopische oder ultramikroskopische Entfernungen kathodisch wirken kann, unmittelbar hinter der negativen ersten Randschicht eine positive Schicht indirekt durch Influenz erzeugt, oder daß das angezogene Natrium ein zugehöriges Chlorion mit zur Darmwand heranschleppt.

Es würde dann die elektrische Spannung der Darmwand eine Konzentrationsströmung erzeugen. Solche sind in Theorie und im Experiment genau bekannt und untersucht, aber nur als s e k u n d ä r e Konzentrationsketten, als Stromerzeuger, nicht als von einem Strom erzeugt, wenigstens nicht bei Neutralsalzen. Diese Erklärung behält unter allen Umständen viel Unbefriedigendes und das Wahrscheinlichste ist, daß die Apparatur, die hiebei mitspielt, uns aus der bisherigen Elektrizitätsforschung noch nicht bekannt geworden ist.

Wenn mein Schema im Achsenzylinder des Nerven, dieser als Dielektrikum (Isolator) gedacht, so einfach gelten dürfte, wie im physikalischen Laboratorium, so müßten die am Rand des Achsenzylinders sitzenden Kaliumionen in diesen eindringen (jedenfalls viel leichter, als das Methylenblau bei den Schnürringen in das Axon eindringt) und in der Richtung der Kanalstrahlen zur Ganglienzelle hinaufwandern, ferner müßte im normalen Leben, solange nicht Reize die Nervenbahn durchlaufen, die Endapparate der Nerven auf mikroskopische oder ultramikroskopische Entfernungen Kathodenstrahlen aussenden. Diese Eigenschaft, die Aussendung von Kathodenstrahlen müßte in einer sehr schwachen Form und auf ultramikroskopische Entfernungen beschränkt, überhaupt eine Fundamentaleigenschaft aller lebenden Zellen sein. Die bisherigen Beobachtungen über Strahleinwirkungen und Ionisierung scheinen diesem Schlusse zumindest nicht zu widersprechen, wenn auch eine direkte Bestätigung bisher meines Wissens nicht vorliegt.

DIE ARTEIGENE ELEKTRISCHE LADUNG.

Mein Grundgedanke, daß jede Zelle eine charakteristische arteigene Ladung hat, ist eine Selbstverständlichkeit; sie gehört zu jenen axiomatischen Grundwahrheiten, die nicht erst durch Versuche bewiesen zu werden brauchen. Gleichwohl gibt es auch Experimente, die zu ganz anderen Zwecken unternommen worden sind und die ich als experimentelle Beweise für die Charakteristik dessen begrüße, was ich das elektrische Gesicht der Zelle nennen möchte.

Vorerst sei auf die bekannten Versuche verschiedener Forscher hingewiesen, daß im chlorverarmten Körper Chlor durch Brom und Jod vertreten werden kann. Man kann sowohl mit Bromwasserstoff als mit Jodwasserstoff verdauen, und die kompliziertesten Lebensäußerungen, z. B. die Nervenarbeit mit Hilfe von Brom statt Chlor durchführen. Die Verwandtschaft zwischen den drei Halogenen ist aber nur in ihrer Elektropolarität begründet. Wenn in einer lebenden Zelle das Chlor durch andere elektrisch ähnliche Elemente vertreten werden kann, so folgt daraus mit voller Bestimmtheit, daß die elektrische Differenziertheit für diese Gattung Zellen charakteristischer und lebenswichtiger ist als die chemische Differenziertheit.

Eine andere Erfahrung, die zu allbekannt ist, um als drastisches Argument zu wirken, ist überhaupt die Art der Nahrungsstoffe, die die Organismen verarbeiten und deren Elektropolarität (natürlich innerhalb der den Organismen angepaßten Grenzen) viel wichtiger zu sein scheint als ihre chemische Natur. Wenn selbst ziemlich niedere Organismen erstens verschiedene Fettsäuren und Glyzeride, zweitens verschiedene Zucker gleichartig verarbeiten, u. z. bei gewissen Objekten, den Glyzeriden, in einer ganz typischen Weise, indem sie sie vorher in ihre elektropolaren Bausteine, in Fettsäure und Alkohole spalten, Glyzeride also in Glyzerylalkohol und Fettsäure, so scheint mir der Schluß zwingend, daß die elektropolare Natur im Zusammenhang mit gewissen anderen Eigenschaften, z. B. Dissoziationsgrad, Ungiftigkeit, Molekülgröße das Hauptkennzeichen der Nahrungsstoffe bildet. Wir essen elektropositive (kathodische) Substanzen gewisser chemischer Atomgruppen, um ihre Elektroaffinität gegen den negativen Luftsauerstoff auszunützen.

Wo immer bisher im Organismus makroskopisch elektrische Eigenschaften von lebenden Zellen bestimmt wurden, immer haben sich elektromotorische Kraft, Stromstärke, elektrischer Widerstand, Leitfähigkeit als Konstanten erwiesen, die sich unter gewissen Umständen genau bestimmen lassen. Ist da der Schluß nicht zwingend, daß auch in den mikroskopischen Zellen arteigene Ladungen, arteigene Isolierungen (also Widerstände), arteigene Leitfähigkeiten, arteigene Kapazitätsgrößen und arteigene Potential-Ausgleiche sich schließlich werden bestimmen lassen?

In den neueren Schriften über die Zellchemie finden sich immer mehr Hinweise auf die Idee, daß elektrische Arteigenschaften des Protoplasmas an dem Zellchemismus mitwirken. In dem prachtvollen dreibändigen Werke von H. J. Hamburger „Osmotischer Druck und Ionenlehre",*) findet sich zum erstenmal bei der rätselhaften Speichelsekretion durch Nervenreizung die Idee, der Speichelfluß könnte durch elektrische Osmose (Kataphorese) mitverursacht sein. Beim Speichel nämlich, bei dem der Zusammenhang mit dem Nervenreiz besonders deutlich ist, äußert sich eine Beobachtung die an sich zweifellos richtig ist, aber immer noch die anthropozentrische Analogie der elektrochemischen Elektrolysierzellen mit ihren bipolaren Strömen vor Augen hat.

Auch an späterer Stelle, bei dem Bilde der Säure-„Ausscheidung" im Magen, kommt er nochmals auf den Gedanken der Kataphorese, also der elektrolytischen Ueberführung zurück, ohne dabei zu verweilen. Einem ernsten, vorsichtigen Gelehrten scheint diese Abschweifung in das Gebiet der Elektrophysik gleichsam als etwas Unerlaubtes.

Und doch wird die Anwendung der Elektrochemie auf Lebensvorgänge über eine gewisse enge Grenze nicht hinauskommen, wenn sie sich nicht von dem Vorurteil freimacht, daß die gewöhnlichen der bisherigen Elektrochemie entnommenen Bilder und Analogien in die Zellphysik nicht hineinpassen, weil diese der Sitz einer vollkommeneren elektrochemischen Technik ist, deren Grundlinien uns noch nicht vertraut sind.

Von den Aufgaben, die die lebende Zelle lösen kann, die der praktische Elektrochemiker aber bis jetzt trotz aller Anläufe

*) Wiesbaden, Bergmann, 1902—1904, p. 434/35.

noch nicht befriedigend hat durcharbeiten können, sei nur erwähnt, daß die lebende Zelle aus Kohlenstoffverbindungen durch ihre Verbrennung mit Sauerstoff elektrische Energie erzeugen kann, eine der unerklärlichsten Geschicklichkeiten der Zelle, die sie mit einem ganz minimalen Aufwand von konstruktiver Arbeit bewältigt. Man ist ganz ahnungslos, welcher technischer Kunstgriff diese Schwierigkeit so spielend überwindet, die in der elektrochemischen Praxis trotz Hunderten von Patenten noch praktisch ganz ungelöst ist, während die Zelle sie so nebenbei behandelt und bei den Spezialorganen der Fische damit kolossale Spannungen herausbringt, während die Erfinder der Kohlen-Sauerstoffelemente noch keine 2 Volt erzeugen können.

MUSKEL-ELEKTRIZITÄT.

Eine der bekanntesten Tatsachen der Elektrophysiologie ist es, daß das Innere eines Muskels (der Querschnitt) unter allen Umständen elektronegativ gefunden wird, gegenüber dem unverletzten Längsschnitt. Mit dieser Tatsache stimmt es gut überein, daß die inneren Elemente der Muskelzelle, wenn dieser ein wenig vieldeutige Ausdruck gestattet ist, sich färberisch basophil tingieren, oder als „Reduktionsort" im Sinne der Methode U n n a s. Ich lege jedoch auf diese lückenlose Uebereinstimmung zwischen den hundertmal wiederholten Experimenten der Elektro-Physiologen und der elektrochemischen Färbungshypothese kein besonderes Gewicht. Bei der groben makroskopischen Messung der Muskelelektrizität werden so viel verschiedenartige Zellelemente auf einmal getroffen, bei der Anlegung eines künstlichen Querschnittes wird ein elektrischer „Strom", der normalerweise nicht existiert, als Elektro-Artefakt hervorgebracht, so daß diese Versuche keine unbedingt entscheidende Beweiskraft besitzen. Man könnte sich beispielsweise vorstellen, daß im Augenblick der Anlegung des Querschnittes eine starke statische Potentialdifferenz sich sofort via Oberflächen-Flüssigkeitshäutchen entlud und daß das, was die Physiologen nachher messen, der entgegengesetzte Polarisationsstrom ist, der aus den elektrolytischen Abscheidungen des ursprünglich entgegengesetzten statischen Entladungsstoßes allmählich abklingt, kompliziert mit Strömen aus

dem Zusammenfließen von Querschnittssäften, die normalerweise von einander isoliert sind.

Es läßt sich aber zeigen, u. zw. mit Zuhilfenahme des sogenannten Stromes der gereizten Muskeln, daß die elektrostatische Betrachtung der kontraktilen Elemente dem wahren Sachverhalt doch etwas näher kommt, als die bisher herrschende rein chemische oder Oberflächenspannungsmethode.

Am ungereizten Muskel läßt sich vorerst*) folgendes feststellen:

1. Ganz frische, unverletzte Muskeln sind völlig stromlos, ebenso total abgestorbene (entspricht vollkommen der Idee des Elektro s t a t i s m u s).

2. Starke elektrische Ströme (ca. 0,1 Volt) sind zwischen dem frischen Querschnitt (—) und der Oberfläche (+) festgestellt, und zwar um so stärker, je weiter der Ableitungspunkt vom Rande des Querschnittes auf jeder Seite entfernt ist (diese Verteilung der Polarität entspricht ebenso genau den elektro-s t a t i s c h e n Erwartungen und der Idee, daß der lebende Muskel sehr vollkommene i n n e r e elektrische Isolationen besitzt).

3. und 4. Die Elektropolarität bei Ableitung von verschiedenen Teilen der Oberfläche entspricht ebenfalls der elektrostatischen Vorstellung und dem Ausfalle der Tinktionen, ebenso 5., wenn der Querschnitt schräg rhombisch geführt wird. In letzterem Fall entstehen die Neigungs„ströme“ von D u B o i s R e y m o n d. Insoweit wirkliche „Ströme“ erscheinen, sind sie Artefakte infolge des Querschnittes.

6. Der ruhende Nerv verhält sich ebenso, also ebenfalls elektrostatisch.

7. Der sensible Nerv soll nach M e n d e l s s o h n und H e l l w i g eine entgegengesetzte Stromrichtung haben, wie der motorische. Diese Experimente werden von W e i ß**) bestritten und stimmen weder mit der elektrostatischen Grundansicht noch mit den ganz identischen Färbungen beider Nervenarten.

Nun lese man die Beschreibung der Ströme des gereizten Muskels, des Nerven und des Auges nach dem neuesten Handbuch***);

*) Nach Landois-Rosemann, Lehrb. der Physiologie, II. Bd., p. 594, Berlin 1916.

**) Literatur bei Landois-Roseminn.

***) p. 601.

Die elektrischen Ströme des ruhenden Muskels und Nerven sind Vorgänge von längerer Dauer. (Hier hat plötzlich der „ruhende“ Muskel oder Nerv, der eine Seite vorher stromlos war, einen Strom; gemeint ist natürlich nicht der ruhende, sondern der quer durchschnittene Muskel, also eine ganz abnormale Kombination, die wie jede andere Kombination chemisch differenter Substanzen einen Strom liefert); sie können daher mit den träg reagierenden Instrumenten (Multiplikatoren, Spiegelgalvanometer) ohne weiteres nachgewiesen werden. Die elektrischen Ströme des gereizten Muskels und Nerven laufen dagegen außerordentlich schnell ab, sie werden daher von schnell reagierenden Instrumenten (Capillarelektrometer, Saitengalvanometer) getreu wiedergegeben. (Diese Einleitung liest sich wie eine Beweisführung dafür, daß überhaupt kein Strom im normalen Gewebe dieser Art existiert, sondern nur Spannung elektrostatisch geladener Dielektrika [Isolatoren]. Da diese Objekte beim Durchtritt einer statischen Entladung elektrolysiert und wahrscheinlich auch anodisch oxydiert und kathodisch reduziert werden, so sind Polarisationsausschläge nach der anderen Seite nach der Entladung zu erwarten und sind auch in fast allen Experimenten vorgefunden worden.)

Auch im Auge entsprachen die Netzhautströme den Erwartungen der statischen Hypothese.

Nun gehen wir an die „Ströme“ des gereizten Muskels. Die Grunderscheinung ist bekannt und mit einigen verlegenen Wendungen auch anderseitig zu erklären versucht worden. Eine Erscheinung jedoch trotzte allen bisherigen Deutungsversuchen, obzwar die Elektrophysiologen Bände von Literatur an diesen Gegenstand verschwendet haben.

Es ist dies die Erscheinung der „negativen Schwankung“. Wird nämlich der Muskel von Oberfläche und Querschnitt zum Galvanometer abgeleitet, so daß ein starker sogenannter „Ruhestrom“ auftritt und nunmehr vom Nerven aus tetanisch gereizt, so schwächt sich sein „Strom“, mitunter sogar bis zum völligen Rückgang auf Null.

Für den Untersucher, der einen Strom eines Leiters von einer statischen Ladung eines Isolators genau unterscheidet und das Wesen des Reizes in einer Ionisierung oder Elektronisierung, jedenfalls in einer inneren Widerstandsverminderung erblickt, muß

die negative Schwankung, die zu so absonderlichen Deutungsverchen geführt hat, genau so erwartet werden, wie sie eintritt. Wenn es wahr ist, daß in dem lebend gebliebenen Gewebe der innere Weg zwischen Querschnitt und Oberfläche elektrisch vollkommen isoliert ist, wenn es wahr ist, daß ein System von Kondensatoren auf den Reiz als Auslösung einer Elektronenwelle wartet, so muß die Entladung nach dem Reiz den Hauptweg vom Querschnitt innen durch zur Oberfläche nehmen und im äußeren Schließungsbogen durch Metalle ein negativer Potentialausgleich erfolgen.

Wenn man sich die Mühe gibt, diese Potentialgefälle an der Hand einer Beschreibung der elektrophysiologischen Fundamentalversuche durchzudenken, so wird man überrascht sein über das nahezu vollkommene Zusammenstimmen zwischen Erwartung und Hypothese. Es sieht so aus, als ob die Hypothese des elektrostatisch geladenen isolierenden Gewebes mit der Widerstandsverminderung durch Reizstrahlen oder Reizwellen eigens dafür gedichtet worden wäre, um die „negative Schwankung" zu erklären. Das war aber nicht der Fall. Die Ueberzeugung von der Isolatornatur der lebenden Reizleiter drängte sich mir auf, erstens aus den Fortschritten der physikalischen Elektronenlehre, die immer mehr die theoretische und praktische Bedeutung, gemeinverständlich ausgedrückt der drahtlosen Telegraphie oder Elektrizitätsübertragung durch Isolatoren (Dielektrika) heraushebt, zweitens aus dem totalen Mißlingen meiner verschiedenen Versuche, galvanische Ströme durch lebende Gewebe richtig zu „leiten“. Ich konnte immer nur konstatieren, daß die alte Idee von der Leitereigenschaft der lebenden Gewebe ein Grundirrtum ist und daß die Ströme an dem wirklich normal lebenden Gewebe immer nur vorbeigehen.

Ferner ergab sich die Isolatornatur der lebenden Gewebe aus dem Ausfalle der Vitalfärbungen, die in solcher Feinheit ohne ein starkes elektrisches Isolationsvermögen nicht zu denken sind.

Aus der sicheren Erkenntnis der Isolatorsnatur ergibt sich von selbst der elektrostatische Charakter vieler Vorgänge, die bisher den galvanischen „Strömen“ zugedacht waren.

Ist man sich erst einmal darüber klar geworden, daß der Muskel elektrostatisch geladen ist, daß er seine Querscheiben

kondensatorisch aufladen muß und daß beim Reizvorgange durch eine Entladung die Elektronen von den kathodischen Platten abstoßen, die positiven Ionen von den Anodenplatten abgehen, daß nach der Entladung die entstandenen neutralen Ionen von dem Sarkoplasma abgesaugt und dadurch die Kondensatorspannung wieder aufgeladen werden kann, so ist es ein Leichtes, Hypothesen zu produzieren über den rätselhaften Vorgang der Muskelkontraktion. Es ist aber erst dann an der Zeit, sich mit diesem Gegenstand zu beschäftigen, bis der Verlauf der Elektrizitätsaufladung und -Entladung im Muskel elektrohistologisch schärfer erfaßt werden kann und bis auch eine sicherere feine Histologie der glatten Muskeln vorliegen wird.

Ganz gewiß aber wird auch die Kontraktion sich leichter erklären lassen, wenn man die elektrostatische Energie mit in den Kreis jener Energien zulassen wird, die bei dem Vorgang mitwirken müssen.

Was bisher experimentell an Elektrizitätsbewegungen der kontraktilen Substanz beobachtet worden ist, stimmt mit dem Gedanken einer fortschreitenden Welle von statisch-elektrischen Potentialausgleichen überein. So läuft beispielsweise die Negativitätswelle der Kontraktionswelle voraus, aber in demselben Abstand. Beide Wellen haben die Geschwindigkeit von etwa 3 m in der Sekunde beim ausgeschnittenen Froschmuskel. Diese Geschwindigkeit bleibt jedoch weit zurück gegen die Elektronengeschwindigkeit von Kathodenstrahl-Teilchen im Vakuum.

DIE NEGATIVE SCHWANKUNG BEIM NERVEN.

Die „negative Schwankung“ des sogenannten Ruhestromes, d. h. die Ausbalancierung der durch einen künstlichen Querschnitt sich ziemlich langsam entladenden elektrischen und chemischen Potentialdifferenzen zwischen Substanzen, die im normalen Leben niemals sich berühren, wird nicht nur beim Muskel beobachtet, sondern vielleicht noch deutlicher und für seine statische Natur bezeichnender beim Nerven.

Wir folgen dabei am besten der ausführlichen Darstellung in W. Biedermanns „Elektrophysiologie“, II. Band, 1895, weil trotz des fabelhaften Aufschwunges der elektrischen Experimentaltechnik in den letzten 22 Jahren die neuen Versuche

gegenüber den älteren nur wenig Fortschritte gebracht haben. Im Gegenteil, während der alte Du Bois Reymond, wie bereits hervorgehoben, die statische Elektrizität von der galvanischen wohl zu unterscheiden gewußt und in separaten Kapiteln behandelt hatte, haben die meisten jüngeren Physiologen die beiden Elektrizitätsarten nicht von einander unterschieden, auch Bernstein nicht, dessen Arbeiten bis 1915 reichen. Bisweilen werden die Begriffe der beiden Energiearten direkt miteinander vermischt.

Schon die Dauer der „negativen Schwankung"

0,024	Sekunden nach	Haas
0,0056	„ „	Hermann
0,0007	„ „	Bernstein

zeigen, daß es sich um eine typische Entladung statischer Elektrizität handelt, nicht um einen Strom von galvanischer Elektrizität.

Auf die negative Schwankung folgt gewöhnlich — wahrscheinlich infolge der chemischen Sekundärwirkung und Polarisation des Gewebes, wie schon die ältere Physiologie annahm — eine sogenannte positive Schwankung. Beides zusammen nennen die Physiologen den Aktions-„Strom" der Nerven oder Muskeln.

Die hier folgende Kurve (aus Landois-Rosemann, II. Bd., 1916) zeigt einen solchen zweiphasischen Aktionsstrom eines Skelettmuskels.

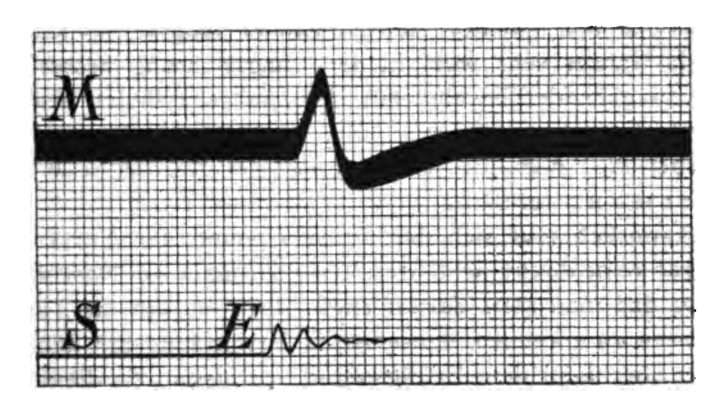


Fig. 4.

Die negative Schwankung beim Nerven verhält sich unter gewöhnlichen Umständen ebenso.

Nicht nur die Zeitdauer und die Kurve sprechen gegen die „Strom"-Natur dieser Erscheinung, sondern ebenso der hohe Leitungswiderstand des Nerven und Muskels, der den des Quecksilbers millionenmal übertrifft. Der Leitungswiderstand der Nerven in der Längsrichtung beträgt nach den Tabellen der Handbücher, deren Richtigkeit ich aus vielen Gründen bezweifeln möchte:

Nerv 0,17, Muskel 1, Blut, Haut 1,25, Hirn 1,57, Fett 3,92, Knochen 14,1.

Daneben nach Umrechnungen von mir Galle 0,45, Harn 0,3 bis 0,6, je nach Konzentration, Kochsalzlösung von 0,88 Prozent (wie Galle) 0,45.

Ein Substrat dieser Art, mit der Leitfähigkeit einer etwa 2 prozentigen Kochsalzlösung, findet im Körper sicher zahlreiche mikroskopische Stellen, in denen die konzentrierten Flüssigkeiten besser leiten wie es selbst, abgesehen davon, daß Harn und Schweiß auch makroskopisch bessere Leiter sind.

Abgesehen davon sind überhaupt alle derartigen Bestimmungen nicht beweisend, nicht einmal bezeichnend für die Leitfähigkeit des Achsenzylinders des Nerven, der doch der gegenwärtigen Vorstellung des „Kernleiters" zu Grunde liegt. Wenn die Ionenverteilung im Nervenquerschnitt so ist, wie sie sich nach Mac Callums und Unnas Bildern darstellen, wenn also zwischen Achsenzylinder und Scheide eine Röhre von Kaliumionen den Isolator Achsenzylinder umgibt, so kann der Nerv als Ganzes sehr wohl in der Längsrichtung besser leiten als das umgebende Gewebe und der Achsenzylinder doch ein idealer Isolator sein.

Ueber die „negative Schwankung" im Nerven heißt es bei Biedermann (p. 650):

Bekanntlich gibt sich der tätige Zustand der Nervenfasern durch gar keine direkt sichtbaren Veränderungen am Nerven selbst kund, so daß man stets darauf angewiesen ist, um die Tätigkeit des Nerven zu erkennen, denselben in Verbindung mit dem Muskel oder überhaupt dem Erfolgsorgane zu lassen. Es dient dieses dann gleichsam als Reagens für den Nerven, da an diesem selbst weder optisch noch chemisch, noch sonst irgendwie nachweisbare

Veränderungen beobachtet werden können. In dem elektromotorischen Verhalten erkannte jedoch Du Bois-Reymond ein Mittel, den tätigen Zustand des Nerven an diesem selbst zu erkennen. Unmittelbar nach Entdeckung des Nervenstromes fand Du Bois-Reymond im Jahre 1843, daß derselbe durch Tetanisieren abnimmt, oder eine „negative Schwankung" erleidet, deren Erscheinungsweise mit jener der negativen Schwankung des Muskelstromes im wesentlichen übereinstimmt. Wie bei dieser letzteren hat Du Bois-Reymond den Nachweis geliefert, daß die Erscheinung als Ausdruck eines veränderten Zustandes des Nerven anzusehen ist und nicht etwa auf irgendwelchen Versuchsfehlern beruht. Es ergibt sich dies insbesondere aus dem Umstande, daß die negative Schwankung schon bei sehr schwachen, abwechselnd gerichteten Induktionsströmen und völlig unabhängig von der Länge der Nervenstrecke beobachtet wird, welche zwischen der abgeleiteten und der Reizstrecke liegt, so daß es sich mit aller Bestimmtheit nur um eine, den Zustand der tetanischen Erregung begleitende Verminderung der elektromotorischen Kraft des durchschnittenen Nerven handelt. Der Betrag der negativen Schwankung, bemessen durch die Größe des durch sie veranlaßten Rückschwunges des Bussolmagneten, ist an allen Stellen eines Nerven der Stärke des ursprünglichen Demarkationsstromes proportional und daher am größten, wenn der Querschnitt und der positivste Punkt der Längsoberfläche, Null, wenn zwei elektrisch gleichartige Punkte abgeleitet werden. Auch im Falle größter Stärke der negativen Schwankung läßt sich bei Anwendung eines aperiodisch schwingenden Bussolmagneten unmittelbar erkennen, daß die Verminderung des Nervenstromes während tetanisierender Reizung niemals bis zu dessen völliger Annullierung geht, so daß stets ein mehr oder weniger großer Bruchteil der Kraft erhalten bleibt. Wie von vornherein zu erwarten war, zeigen marklose Nerven die negative Schwankung des Demarkationsstromes ganz ebenso wie markhaltige.

Im Anschlusse daran wird nun die „positive" Nachschwankung beschrieben, die sich galvanisch ebensogut erklären läßt wie statisch, weil zumindest eine starke Komponente in ihr auf galvanische Polarisation zurückzuführen ist.

Auch bei nicht elektrischer Reizung, bei thermischer Rei-

zung, bei chemischer Reizung, bei Durchschneidung und Quetschung des Nerven erscheint die negative Schwankung des Nerven. Für die elektrostatische Betrachtungsweise ist diese innere Entladung der sonst durch den künstlichen Querschnitt äußerlich abgeleiteten Potentialdifferenzen auch bei anderer als elektrische Reizung klar, ebenso daß galvanische Reizungen konträrer Stromesrichtung im wesentlichen dieselbe negative Schwankung erzeugen.

Wie bereits an anderer Stelle hervorgehoben, erscheint vom elektrostatischen Gesichtspunkt aus der Reiz oder die Erregung als eine Auslösung von chemischen oder elektrochemischen gerichteten Kräften, die der Assimilationsrichtung entgegengesetzt sind. Wie bei Biedermann (p. 723 ff.) hervorgehoben wird, hat schon der ältere Hering über den Dissimilationsvorgang als gerichtete Kraft sehr klare Vorstellungen herausgearbeitet, welche, wie auch Biedermann konstatiert, bei ihrem Erscheinen nicht die gebührende Beachtung gefunden haben. Das läßt sich erklären erstens daraus, daß sie mit den experimentellen Tatsachen in einem gewissen Widerspruch stand, weil Hering auf Grund der damaligen Elektrizitätslehre den positiven Strom als einen tatsächlichen Strom in sein Vorstellungsbild einfügte, während wir heute wissen, daß eigentlich nur der negative Strom als solcher bezeichnet werden könnte und zweitens deshalb, weil auch Hering, dem Zeitgebrauch entsprechend, unter der Suggestion des Galvanismus stand.

Sieht man aber von diesen zwei Punkten ab und korrigiert die Anode als Eintrittsstelle des Konvektionstroms in die Kathode um, und abstrahiert von dem heute als Artefakt feststehenden „Ruhestrom“ der normalen Gewebe, so behalten Herings Betrachtungen von 1882 ihren fundamental richtigen Charakter. Hering geht (nach Biedermanns Darstellung) von der Voraussetzung aus, daß die einen Muskel oder Nerven in der Längsrichtung durchsetzende elektrische Strömung die erregbare Substanz an der physiologischen Anode und Kathode in entgegengesetztem Sinne chemisch verändert, oder, wie man es wohl richtiger ausdrücken würde, an beiden Stellen antagonistische Veränderungen des Chemismus der betreffenden Substanz herbeiführt, indem an allen Punkten, wo der Strom in die unversehrte lebende Substanz eintritt, die assimila-

torischen Prozesse ins Uebergewicht kommen und im Sinne der von Hering gewählten Ausdrucksweise (vergl. p. 71 f.) eine „allonome aufsteigende“ Änderung bewirken, während an der Gesamtheit der Austrittsstellen die Dissimilation (der Zerfall) vorherrscht und zu einer „allonomen absteigenden“ Änderung führt. Nun ist unstreitig jede Erregung im gewöhnlichen Wortsinne charakterisiert durch das Vorherrschen der dissimilatorischen Prozesse, wobei es zunächst ganz gleichgültig ist, ob dieselbe auf den Ort ihrer Entstehung beschränkt bleibt oder sich von da aus durch Leitung weiter fortpflanzt. Unter allen Umständen wird daher die physiologische Kathode der Sitz einer während der Schließungsdauer des Stromes anhaltenden Erregung, der Schließungserregung, sein müssen.

(Hier spricht Hering von der Fundamentaleigenschaft der lebenden Materie, daß diese nicht einfach chemische Reaktionen wie im Laboratorium entwickelt, sondern je nach der Assimilations- oder Dissimilationsrichtung dasjenige, was ich als gerichtete chemische Kräfte, als chemische Vektoren bezeichne.)

Minder geläufig sind die Anschauungen, welche Hering in Anlehnung an gewisse Folgerungen seiner Theorie des Lichtsinnes bezüglich der Vorgänge an der Anode entwickelt. „Wie man sich äußere Reize denken kann, welche die lebende Substanz zu stärkerer Dissimilierung (D) nötigen, so kann man sich auch solche denken, welche sie zu stärkerer Assimilierung (A) veranlassen. Die stärkere, nicht mehr lediglich „autonome“ Assimilierung, welcher jetzt keine gleich starke Dissimilierung das Gleichgewicht hält, bewirkt eine Beschaffenheit der Substanz, welche das Gegenteil der durch die D bewirkten „unterwertigen“ ist und daher von Hering als „überwertig“ bezeichnet wird.“ „Nach Schluß des (assimilatorisch wirkenden) Reizes befindet sich die Substanz gleichsam in einem übernährten Zustande; ihre Disposition zur A ist jetzt geringer als vorher, und zwar um so mehr, je größer die Stärke und Dauer des Reizes und dem entsprechend das Ueberwiegen der allonomen A über die autonome D war. Entsprechend größer ist jetzt ihre Disposition zur D. So entsteht nach Schluß der Reizung ein Ueberwiegen der autonomen D über die autonome A (d. h. eine Erregung im gewöhnlichen Wortsinn), durch

welche unter allmählicher Abnahme der Ueberwertigkeit die Substanz wieder in den mittelwertigen Zustand zurück gelangt“ (l. c. p. 39). Den Einfluß der Anode auf Muskel und Nerv hätten wir nun nach H e r i n g als einen solchen assimilatorisch wirkenden Reiz aufzufassen. „War die lebende Substanz zuvor z. B. im Zustande der Mittelwertigkeit und also zugleich im autonomen Gleichgewichte zwischen D und A, so wird sie unter der Einwirkung des Stromes an der Eintrittsstelle ü b e r w e r t i g. Nach Schluß der Durchströmung tritt demzufolge an der Eintrittsstelle eine autonome absteigende Änderung ein, welche um so rascher ist, je überwertiger die Substanz durch die vorausgegangene aufsteigende Änderung geworden war; so kann die Eintrittsstelle zum Ausgangspunkt einer abermaligen, sich über die Faser fortpflanzenden Erregung (Öffnungserregung) werden.“

Da während der Durchströmung an der Austrittsstelle eine rasche allonome absteigende Änderung stattfindet, so verhält sich dieselbe negativ zur übrigen Faser, insoweit sich dieselbe nicht in fortgepflanzter „Erregung“ befindet, während die Eintrittsstelle in Folge der hier stattfindenden allonomen aufsteigenden Änderung sich entgegengesetzt verhält. Dies würde also an sich einen dem durchgeleiteten Strom entgegengesetzten Eigenstrom der Faser im Kreise bedingen. Dieser Eigenstrom schwächt den zugeleiteten Strom. Man hat ihn als einen Polarisationsstrom bezeichnet. Er ist jedoch als ein v i t a l e r G e g e n s t r o m und als eine eigentliche Lebenserscheinung streng zu unterscheiden von jenen Polarisationsströmen, welche nicht eigentlich vitale sind, weil sie nicht durch die an den Ein- und Austrittsstellen stattfindende, auf- und absteigende Änderung der lebendigen Substanz bedingt werden; denn auch im toten Gewebe, beziehungsweise an den nicht eigentlich erregbaren Teilen der noch lebenden Organe können bei künstlicher Durchströmung Gegenströme entstehen.

Man sieht hier, daß H e r i n g, gestützt auf seine zahllosen Experimente an dem Sehnerv und anderen sensiblen und motorischen Nerven zu denselben Anschauungen gekommen ist, die sich aus deduktiven Ueberlegungen über die Akkumulatoren-Natur und Kondensatoren-Natur der lebenden Zellen ergeben und zu denen auch S l e e s w y k wieder ausgehend von ganz anderen Ueberlegungen und Beobachtungen auf einem anderen

Weg gelangt ist, nämlich daß ein Reiz, oder wie wir, gestützt auf die seitherige Entwicklung der Wellen-Uebertragung, sagen wurden, eine statische Entladung oder ein Strahl kleinster Elektrizitätsträger, von Elektronen oder von positiven Ionen, ein Gleichgewicht antagonistischer Energien der assimilatorischen Ladungsarbeit und der dissimilatorischen Ionisierungskräfte zu entladen bestimmt ist.

DER ELEKTROTONUS.

Der lebende Nerv zeigt noch eine andere wichtige Eigenschaft, die einen Prüfstein aller elektrophysiologischen Theorien bildet, nämlich den Elektrotonus. Ueber die hieher gehörigen Be-

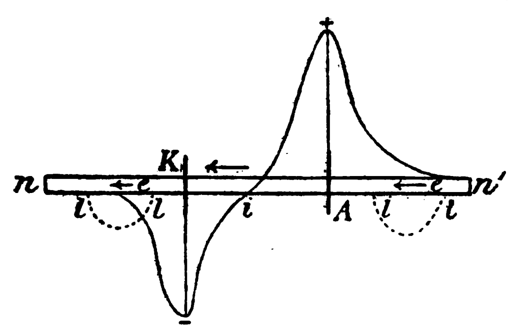


Fig. 5.

obachtungen sei wieder Biedermanns Elektrophysiologie (II. Bd., p. 670 ff.) zitiert:

Es wurde schon früher erwähnt, daß unter dem Einfluß eines Kettenstromes, welcher mit gleichbleibender Dichte irgend einen Teil eines markhaltigen Nerven dauernd durchfließt, polare Erregbarkeitsänderungen hervortreten, welche nicht, wie beim Muskel im wesentlichen auf die Berührungspunkte der Elektroden bezw. die unmittelbar sichtbaren Ein- und Austrittsstellen des Stromes beschränkt bleiben, sondern darüber hinaus nicht nur die intrapolare Strecke ergreifen, sondern sich auch extrapolar mehr oder weniger weit ausbreiten. Dem entsprechen nun, wie Du Bois-Reymond schon 1843 fand, auch Veränderungen im galvanischen Verhalten, welche, wie jene, als eine Teilerscheinung des Elektrotonus zu bezeichnen sind und gewissermaßen nur zwei verschiedene Seiten eines und desselben Vorganges darstellen. Sei nn′ (Fig. 5) ein Nerv,

A und K zwei Elektroden, durch welche ein Kettenstrom in der Richtung von A nach K geleitet wird; A ist also die Anode, K die Kathode des zur Erzeugung des Elektrotonus angewendeten Stromes. Sobald dieser geschlossen wird, werden alle Stellen des Nerven zur Seite der Kathode (von K bis e) negativer, alle Stellen zur Seite der Anode (von A bis c) positiver, als sie vorher waren. Der Grad dieser Veränderungen ist aber nicht an allen Stellen gleich, sondern dicht an den Elektroden am größten und nimmt mit der Entfernung von denselben ab. Stellen wir von A nach e hin den Grad des positiven Zuwachses durch Linien dar, deren Höhe den Zuwachs ausdrückt und verbinden die Kuppen dieser Linien, so erhalten wir eine Kurve, deren Gestalt uns ein anschauliches Bild von der an jeder Stelle auftretenden Veränderung der Spannung gewährt. In gleicher Weise stellen wir die Veränderungen an der Kathodenseite dar, nur ziehen wir, um gleich anzudeuten, daß hier die Spannungen negativ werden, die betreffenden Ordinaten nach abwärts vom Nerven als Abszissenachse. Die beiden Kurvenstücke lehren uns nur das Verhalten der extrapolaren Nervenstrecken. In der Tat wissen wir nicht, wie sich der Nerv in der intrapolaren Strecke verhält, weil es aus äußeren technischen Gründen unmöglich ist, diese Strecke zu untersuchen. Wir können nur vermuten, daß die Spannungsänderungen sich dort ähnlich gestalten, wie es durch die verbindende, durch (i) gehende Linie versinnlicht wird. Es muß ausdrücklich bemerkt werden, daß durch diese Kurven keineswegs die wirkliche relative Größe der Spannungen an den einzelnen Punkten der extrapolaren Nervenstrecke ausgedrückt werden soll, sondern daß dieselben nur ganz im allgemeinen die Tatsache der allgemeinen Abnahme von den Polen aus versinnlichen.

Da der zu untersuchende Nerv in der Regel von zwei Querschnitten begrenzt und daher von vornherein elektromotorisch wirksam ist, so muß es bei entsprechender Ableitung notwendig zu einer Interferenz zwischen dem Demarkationsstrom (Längsquerschnitt-Strom) und dem natürlich stets im Sinne des polarisierenden, gerichteten, elektrotonischen Zuwachsstromes kommen, wodurch an dem einen Ende des Nerven eine negative, an dem andern eine positive Schwankung des Längs-Querschnittsstromes bedingt wird, die so lange dauert als der polarisierende

Kettenstrom geschlossen bleibt (Fig. 6). Verschiebt man den ableitenden Bogen vom Querschnittsende nach der Mitte hin, so erhält man, wie leicht ersichtlich, beiderseits von der durchflossenen Strecke stets Ablenkungen am Galvanometer im Sinne des polarisierenden Stromes. Dies wird natürlich auch dann der Fall sein, wenn der beiderseits durchschnittene Nerv in unwirksamer Anordnung aufliegt, d. h. mit zum Äquator symmetrischen Punkten die Bussolelektroden berührt und seitlich davon durchströmt wird. Man kann daher den Tatbestand auch in folgender Weise ausdrücken:

Wird durch einen Teil eines markhaltigen Nerven ein konstanter Strom geleitet, so wird der ganze Nerv unter Beibehaltung seiner ursprünglichen elektromotorischen Wirksam-

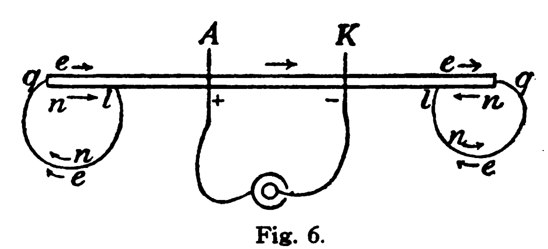


Fig. 6.

keit auf allen Punkten im Sinne des polarisierenden Stromes elektromotorisch wirksam, indem jeder beliebige Punkt des Nerven sich gegen jeden in der Richtung des Stromes vor ihm gelegenen Punkt negativ verhält.

Die Größe der elektrotonischen Ablenkungen nimmt, wie aus der Verteilung der Spannungen ohne weiteres ersichtlich ist, mit der Entfernung der abgeleiteten Strecke von den Polen stetig ab; sie ist unabhängig von der Stärke des polarisierenden Stromes.

An der Anode ist der Elektrotonus gewöhnlich stärker als an der Kathode. Grünhagen gibt in einem Fall an 0,5 Daniell an der Anode, 0,05 an der Kathode. (Die erste Ziffer ist unwahrscheinlich hoch); in jedem Fall aber übertrifft das Maximum des Anelektrotonus das des Katelektrotonus. Die Größe des elektrotonischen Zuwachses wächst mit der Verlängerung der durchflossenen wirksamen Strecke. Auch die Richtung des polarisie-

renden Stromes zur Längsachse ist von Einfluß, und zwar zeigt es sich, daß der Zuwachs wie auch die Erregung am größten ist, wenn der polarisierende Strom den Nerven der Länge nach durchfließt, dagegen gleich Null bei einer Querschnittdurchströmung.

Durchschneidung oder Quetschung des Nerven zwischen polarisierender und abgeleiteter Strecke hebt jede Spur der Wirkung auf. (Diese durch zahllose Beobachtungen sichergestellte Tatsache ist ein besonders deutlicher Beweis dafür, daß das Bild des galvanischen „Kernleiters“ total falsch ist. Denn der gequetschte Nerv bleibt noch immer ein „Leiter“ der Elektrizität, seine Leitfähigkeit kann sich nach dem, was wir über Leitfähigkeit von Geweben wissen, höchstens um 2 Millionteł der Leitfähigkeit des Quecksilbers geändert haben! Und trotzdem das Aufhören jeder Spur einer Wirkung!)

Die Ausbreitung des Elektrotonus ähnlich wie die der Erregung ist also an die unversehrte Kontinuität des markhaltigen Nerven gebunden. (Dieses Experiment beleuchtet die Elektrohistologie der markhaltigen Faser als zwei ineinandergesteckte Röhren von Ionen zwischen zwei Isolierschichten, der inneren des Achsenzylinders und der äußeren der Markscheide. Durch den von außen induzierten Strom müssen diese Ionen, welche die Richtung der Kanalstrahlen haben, von der Anode zur Kathode verschoben werden. Diese Verschiebung haben auch alle anderen Hypothesen widerspruchslos deuten können. Ein konstanter Strom, der einen Nerven in der Längsrichtung durchfließt, erzeugt natürlich abnormale Elektrizitätsbewegungen. Daß dadurch die Anode anodischer, die Kathode kathodischer wird, läßt sich auf die verschiedenste Weise befriedigend erklären.)

Das Sonderbare vom Standpunkt der älteren Theorien ist nur, daß der gequetschte Nerv jede Spur der elektrotonischen Wirkung verliert und daß der marklose Nerv sie niemals zeigt.

Nach diesen Beobachtungen möchte ich vermuten, daß die Bilder von Mac Callum nur eine einzige Ionenröhre erkennen lassen, die der positiven Ionen und daß die entgegengesetzt sich verschiebende Kondensator-Belagröhre der negativen Ionen oder der Elektronen bisher noch nicht histologisch festgehalten worden ist. Sie fehlt auch in Unnas Oxydationsorten,

die sie eigentlich als Ring um die Markscheide, oder als positiver Gegenbelag hätten darstellen müssen; sie ist entweder überhaupt nicht vorhanden, oder unterhalb der Grenze der mikroskopischen Sichtbarkeit.

Etwas aber geht eklatant aus den Artefakt-Strömen des Elektrotonus der unversehrten markhaltigen Nerven hervor, nämlich die Tatsache, daß zur Erzeugung von dieser Art der Nervenerregung, die sich auch viel rascher fortpflanzt als natürliche Nervenreize, also etwas Grundverschiedenes ist, zwei von einander geschiedene Isolierbahnen benötigt werden, und diese fundamental wichtiger sind als die bloße elektrolytische Leitfähigkeit, die ja der gequetschte Nerv ebenso sicher besitzt wie der marklose Nerv.

Lassen wir nun weiter den Bericht Biedermanns über das Tatsächliche folgen: „Nicht nur eine vollständige Unterbrechung des Leitungsvermögens, sondern auch jede irgend erhebliche Verminderung desselben, sowie überhaupt der Leistungsfähigkeit des Nerven beeinflußt in mehr oder weniger hohem Grade die Stärke des Elektrotonus. An gänzlich abgestorbenen oder sonstwie in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften eingreifender veränderten Nerven läßt sich kein Elektrotonus nachweisen oder es treten höchstens Spuren der gesetzmäßigen Wirkungen hervor. Die ganze Erscheinung ist somit zweifellos an bestimmte, nur im lebenden, unversehrten, markhaltigen Nerv vorhandene Struktureigentümlichkeiten geknüpft. Von ganz besonderer Wichtigkeit ist hier vor allem auch die Tatsache, daß unter sonst gleichen Umständen elektrotonische Zuwachsströme in dem bisherigen Sinne weder an marklosen Nerven noch an Muskeln und anderen feuchten Leitern (feuchten Fäden) beobachtet werden, so daß unter den erforderlichen Struktureigentümlichkeiten das Vorhandensein der Markscheide in erster Linie zu stehen scheint.“

Ein Experiment, das zweifellos viel mit zur „Strom-“ und „Kernleiter“-Theorie beigetragen hat, ist das Induzieren eines Elektrotonus entgegengesetzter Richtung in einem durchschnittenen Nerven, der neben einen elektrotonischen parallel auf-

gelegt wird, ein Experiment, das eine Häufung von elektrischen Artefakten darstellt, die undenkbar in der normalen Natur sind, das aber naturgemäß keine Widerlegung des Elektrostatismus bildet, solange man nicht in einem lebenden Nerv einen konstanten Strom von Querschnitt zu Querschnitt gefunden haben wird und nicht das gerade Gegenteil, nämlich Stromlosigkeit.

Wenn auch das Experiment der parallel aufeinander gelegten Nerven, von denen der Elektrotonus des einen den entgegengesetzten des andern induzierte, die Idee des „Kernleiters" befestigen konnte, so ist es mir doch nicht klar, wie man hat übersehen können, daß der einfache Eletrotonus der beiden Figuren aus Biedermanns Elektrophysiologie ein direkter Gegenbeweis gegen die Kernleiter-Idee ist. Denn, wenn der markhaltige Nerv tatsächlich einen Achsenzylinder von höherer Leitfähigkeit besäße, umgeben von einer Markscheide, so hätte doch im Achsenzylinder nach dem bekannten Grundsatz des Galvanismus ein induzierter Gegenstrom erzeugt werden müssen. Das heißt, die Anode hätte kathodischer werden müssen, die Kathode anoscher, gerade umgekehrt, wie das gezeichnete Schema und alle übereinstimmenden Experimente es angegeben haben.

Die galvanischen Grundgesetze würden fordern, daß in der markhaltigen Faser, wenn diese nicht noch viel komplizierter strukturiert ist, als die gegenwärtigen Mikroskope erkennen lassen, zumindest zwei von einander isolierte Kernleiterbelegungen vorhanden sind, von denen eine ganz innere sich dann parallel der Richtung des künstlichen Stromes verschiebt. Ich glaube jedoch, daß die ultramikroskopische Histologie viel komplizierter ist als die bisher sichtbare und daß wir auch die physikalischen Gesetze der ultramikroskopischen und molekularen Ionenverschiebung noch zu wenig kennen, um positive Vermutungen aufstellen zu können.

DIE NARKOSE AM NERVEN.

Biedermann hat auch Versuche über die Wirkung von Äther und Chloroform auf die elektrischen Eigenschaften der Nerven gemacht. Diese Versuche sind besonders interessant für die elektronische Ausdeutung der Erregungsübertragung. Es sei

zuerst das Tatsächliche in Biedermanns Darstellung*) wiedergegeben:

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen bildet die Unterscheidung eines physikalischen und physiologischen Elektrotonus. „Eine Aussicht hierzu schien sich durch Versuche an mit Äther oder Chloroform narkotisierten markhaltigen Nerven zu ergeben, bei welchen alle durch Leitung fortgepflanzten Veränderungen sicher ausgeschlossen erscheinen.

Bei derartigen Versuchen stellte sich nun heraus, daß schon kurze Zeit nach Beginn der Ätherwirkung (etwa nach 5—10 Min.) alle sonst in größerer Entfernung von der durchflossenen Strecke zu beobachtenden elektromotorischen Veränderungen des Nerven wegfallen. Dies gilt sowohl hinsichtlich der oben erwähnten negativen Schwankung bei Schließung eines absteigend gerichteten Kettenstromes, wie auch bezüglich der positiven Wirkungen bei aufsteigender Reizung. Zur selben Zeit bleibt auch die gewöhnliche negative Schwankung bei tetanisierender Reizung der Nerven aus, was beweist, daß das Leitungsvermögen wirklich aufgehoben ist. Da gleichzeitig die physikalische und chemische Beschaffenheit des Nerven durch die Ätherbehandlung nicht wesentlich alteriert sein kann, wofür einerseits das vollkommene Gleichbleiben der Spannungsdifferenz zwischen Quer- und Längsschnitt, andererseits aber auch die Möglichkeit rascher Wiederherstellung aller normalen Lebenseigenschaften des Nerven nach Aufhören der Narkose spricht, so wird schon hierdurch die erwähnte Doppelnatur des Elektrotonus wahrscheinlich gemacht; denn es erscheint derselbe dann nicht allein abhängig von dem Erhaltensein der normalen Strukturverhältnisse der Nerven, sondern auch wesentlich von dessen Leitungsvermögen.

Es läßt sich nun aber außerdem stets zeigen, daß zu einer Zeit, wo während der Äthernarkose keine Spur elektrotonischer Wirkungen in größerer Entfernung von der Reizstrecke nachgewiesen werden kann, in der Nähe derselben starke und gesetzmäßige Elektrotonusströme vorhanden sind, deren Verhalten bei länger fortgesetztem Ätherisieren von großem Interesse ist.

---

*) II. Bd., pag. 694 ff.

Bekanntlich läßt sich unter normalen Verhältnissen ausnahmslos eine sehr beträchtliche Verschiedenheit in der Stärke der zur Seite der Anode und Kathode hervortretenden elektromotorischen Wirkungen nachweisen, was insbesondere bei Anwendung schwacher und mittelstarker Kettenströme überaus deutlich ist. Daher kommt es, daß in einiger Entfernung von der Reizstrecke Ablenkungen im Sinne des Katelcktrotonus oft gänzlich fehlen oder nur spurweise auftreten, während nach Wendung des Stromes unter sonst ganz gleichen Verhältnissen Anelektrotonus in sehr beträchtlicher Stärke vorhanden sein kann. Aber auch in der Nähe der Reizstrecke ist der Größenunterschied der kat- und anelektrotonischen Ablenkungen immer sehr bedeutend und beträgt oft mehr als das Doppelte.

Dies ändert sich nun aber vollkommen unter dem Einfluß der fortschreitenden Ätherwirkung, und zwar derart, daß die anelektrotonischen Ablenkungen bei stets gleicher Reizung rasch an Größe abnehmen, während die Wirkungen des Katelektrotonus zunächst ganz unverändert bleiben oder sogar an Stärke etwas zunehmen. Es tritt dann in der Folge immer ein Zeitpunkt ein, wo die kat- und anelektrotonischen Ablenkungen sowohl hinsichtlich ihrer Größe wie auch bezüglich ihres zeitlichen Verlaufes vollkommen gleich sind und, wie schon hier bemerkt sei, es dann auch bei jeder beliebigen Stromesintensität bleiben. Dabei ist hervorzuheben, daß die Zunahme der Ablenkungen bei wachsender Stromstärke in späteren Stadien der Äthernarkose nahezu proportional erfolgt. Setzt man die Narkose genügend lange fort, so werden schließlich, wie es ja von vorneherein erwartet werden mußte, auch die katelektrotonischen Wirkungen beeinflußt, allein die mit der Zeit zunehmende Verminderung der betreffenden Ablenkungen hält dann durchaus gleichen Schritt mit der gleichzeitigen Abnahme des Anelektrotonus.

Unterbricht man die Ätherwirkung erst zu einer Zeit, wo bereits jeder merkliche elektrotonische Reizerfolg verschwunden ist, so tritt niemals eine Wiederherstellung der normalen Lebenseigenschaften des Nerven ein; derselbe ist dann, wie sich sowohl durch die physiologische, wie auch durch die anatomische Untersuchung herausstellt, als abgestorben zu betrachten, indem die Markscheide der einzelnen Fasern jene bekannten Zerklüftungen zeigt, welche für tote Nerven so charakteristisch sind. Wird da-

gegen das Präparat schon früher, unmittelbar nach erreichter Gleichheit der gegensinnigen, elektrotonischen Ablenkungen, der Einwirkung des Äthers entzogen und in eine geräumige feuchte Kammer gebracht, so tritt alsbald Erholung ein, die sich zunächst durch ein rasches Zunehmen der Größe der anelektrotonischen Ablenkungen bei völligem Gleichbleiben der Wirkung des Katelektrotonus äußert. Unter günstigen Umständen erfolgt an lebenskräftigen Präparaten nach vorsichtig durchgeführter Narkose eine vollständige Wiederherstellung der normalen Eigenschaften, insbesondere auch des Leitungsvermögens des Nerven; in anderen Fällen bleibt dagegen eine merkliche Schädigung zurück, die z. B. an Präparaten von Kaltfröschen sich dadurch äußert, daß die negative Schwankung des Nervenstroms als galvanischer Ausdruck der Schließungs- oder Öffnungserregung nach Beendigung der Narkose sehr oft nicht wieder hervortritt. Auch läßt sich nicht selten eine deutliche und bleibende Verminderung der negativen Schwankung bei tetanisierender Reizung mit Induktionsströmen nachweisen."

Biedermanns Darstellung ist hier fast wörtlich wiedergegeben, nur die Unterstreichungen sind hinzugefügt. Die tatsächlichen Versuchsergebnisse scheinen mir zwanglos zu der elektrostatischen Hypothese zu passen bis auf den Umstand, daß das vollkommene Gleichbleiben der Spannungsdifferenz zwischen Quer- und Längsschnitt nicht dazu stimmt und wahrscheinlich nicht genügend scharf untersucht worden ist. Diese Angabe erscheint äußerst unwahrscheinlich im Vergleich mit der am Schlusse erwähnten deutlichen Schwächung aller anderen Lebenseigenschaften des Nerven.

Aus den unterstrichenen Stellen geht bereits hervor, zu welchen unzutreffenden und gewaltsamen Analogien mit galvanischen Drähten die galvanische Richtung greifen muß, um eine ganz äußerliche Beziehung zu bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten herzustellen. Biedermann, der bei dem betreffenden Kapitel gezeigt hat, daß ein „Ruhestrom" in keinem einzigen der untersuchten Tausenden von Nerven im unverletzten Zustand vorgefunden wurde, spricht vom galvanischen Nervenstrom, er spricht von dem durch Ätherwirkung unterbrochenen „Leitungsvermögen", wobei aus den Umständen hervorgeht, daß er an ein galvanisches Leitungsvermögen denkt. Natürlich weiß

Biedermann sehr wohl, daß der Nerv kein galvanisches Stromleitungsvermögen im normalen Leben erkennen läßt und daß die Reize billionenmal langsamer im Nerven fortgeleitet werden wie die Elektrizität im Leiter erster Klasse.

Nun könnte man einwenden, daß Biedermann nicht an ein „galvanisches" Leitungsvermögen gedacht hat, sondern an das physiologische Reizleitungsvermögen, das vom Narkotikum beeinträchtigt wird. Indessen zeigt die ausführlich wiedergegebene Schilderung des Elektrotonus narkotisierter Nerven, daß das Einwirken eines künstlichen galvanischen konstanten Stromes, der naturgemäß wirkliche galvanische Stromlinien im Nerven erzeugen muß, wenn diese auch Artefakte sind und mit dem normalen Leben nichts zu tun haben, daß also auch diese wirklichen, wenn auch künstlichen Ströme durch die Narkose in einer gewissen Entfernung von der Reizstrecke bis auf Spuren aufgehoben werden.

Die Tatsachen stellen sich also folgendermaßen dar: Wir haben einen galvanischen Strom, den wir auf ein kurzes Stück eines lebenden Nerven einzuleiten versuchen, worauf beim normalen, nichtnarkotisierten Nerven auf beiden Seiten der künstlichen Stromstrecke gesetzmäßige galvanische Ströme nachzuweisen sind. Der normale, nicht narkotisierte Nerv hat eine galvanische Leitfähigkeit von rund einem Milliontel der Leitfähigkeit eines gleich starken Quecksilberfadens.

Der Effekt der Narkose äußert sich nun in der Weise, daß die Nervensubstanz in sich Bruchteile von Prozenten oder Promillen ihrer Masse von Chloroform oder von Äther aufnimmt und daß daraufhin eine fundamentale Eigenschaftsänderung eintritt: der Nerv mit seiner Leitfähigkeit von einem Milliontel Metalleitfähigkeit hört auf zu leiten, oder, wie die Elektrophysiologen sich ausdrücken, sein „Leitvermögen" ist unterbrochen.

Das bedeutet nicht, daß die elektrische Leitfähigkeit durch das Tausendstel Gramm Chloroform sich wesentlich geändert haben kann. Es sind meines Wissens niemals darüber Versuche bekannt geworden, aber es zweifelt wohl niemand daran, daß der Chloroformnerv galvanische Elektrizität nicht erheblich schlechter leitet als der gesunde Nerv, das bedeutet nur, daß eine ganz verschwindend kleine Beimischung zu der fettigen Isolatorsubstanz des Nerven es für die Dauer des Vorhandenseins dieser

ganz verdünnten Lösung der Narkotika im Nerven unmöglich macht, auch künstliche galvanische Ströme im Nerven über die Reizstrecke hinaus zu verschieben.

Wir besitzen in der Molekularphysik und in der physikalischen Chemie keinen einzigen Fall, in dem es möglich ist, in einer Kolloidkonstruktion, wie sie der lebende Nerv bildet, durch eine Auflösung einer ganz verdünnten Substanz eine Leitungsunterbrechung, also eine Isolierung zu erzeugen, wohl aber zahllose Fälle des Gegenteils, wo die Beimischung oder Auflösung eines chemischen Stoffes (am stärksten bei den Salzen) plötzlich eine Aufhebung der Isolierung, also einen Leitungsschluß hervorbringt. Das bekannteste Beispiel ist das Wasser, das ganz rein ein ganz minimales Leitvermögen besitzt und das durch die geringsten Verunreinigungen, durch die leisesten Spuren von Salzen oder von aufgenommener Kohlensäure der Luft ein vielfaches Leitvermögen erhält.

Die Experimente am narkotisierten Nerven ergeben also mit zwingender Beweiskraft aufs neue die Grundtatsache, daß die große Isolierfähigkeit (und nicht die Leitfähigkeit) das Hauptkennzeichen des normalen Lebens ist und daß das Aufhören der Narkose, die Erholung, durch die Rückkehr des Isoliervermögens charakterisiert ist, nicht durch die Rückkehr des Leitvermögens, eine Beobachtung, die sich aus so unzähligen Tatsachen und Experimenten bei Pflanzen und Tieren aufdrängt.

Die Wirkung der Narkose läßt sich, wie ich hoffe, aus der nicht einseitig galvanisch-elektrischen Ableitung etwas besser verstehen als nach der veralteten, rein galvanischen Analogie. Zu der Entwicklung dieser Betrachtungsweise muß aber etwas weiter ausgeholt werden. Vor allem müssen die galvanischen und die statischen Begriffe des Isoliervermögens (Dielektrizitätskonstante) und des galvanischen Widerstandes, die sich nicht ganz decken, auseinander gehalten werden.

Außer der galvanischen Leitfähigkeit, die allen Physiologen genau bekannt ist, gibt es noch eine zweite charakteristische elektrische Eigenschaft eines Körpers in bezug auf seinen Widerstand, und zwar spielt letztere Konstante gerade bei den Stoffen, die galvanisch wenig oder gar nicht leiten, den sogenannten Isolatoren oder Dielektrika eine große Rolle. Die Dielek-

trizitätskonstante D eines Stoffes*) ist proportional der Kapazität eines Kondensators, dessen isolierende Zwischenschicht, das Dielektrikum, eben diesen Körper bildet. Ist C die Kapazität eines Kondensators in Luft, deren Dielektrizitätskonstante (strenger die des Äthers) man gewöhnlich gleich 1 setzt, und C die in dem zu untersuchenden Medium, so ist die gesuchte Größe

$$D_1 = \frac{C_1}{C}$$

Eine andere Definition, die für manche Zwecke anschaulicher ist, geht von der Anziehungskraft zweier entgegengesetzt geladener Kugeln in Luft aus. D stellt dann den Faktor dar, mit dem die Kraftwirkung in dem zu untersuchenden Medium multipliziert werden muß, um die in Luft wirkende Kraft zu erhalten. D ist stets größer als eins.

Wasser ist einer jener Stoffe, die die höchste Dielektrizitätskonstante unter allen haben. In Le Blancs Elektrochemie werden unter 50 oder 60 untersuchten Stoffen nur einer angeführt, der eine höhere Dielektrizitätskonstante hat als Wasser, nämlich Formamid 84 (gegen Wasser 81,7). Dagegen haben Nitrobenzol 35,4, Äthylalkohol 25,2, Azeton 21,4, Äthylsenföl 19,7, Dimethylsulfid 6,2 Benzol 2,26, Toluol 2,31, Äther 4,36, Chloroform 4,95.

Man sieht, daß Wasser, wenn man es ganz rein und undissoziiert erhalten könnte, unter Umständen ein stärkerer Isolator sein könnte als Öle. Man kann sich vorstellen, daß eine Wasserhaut, zwischen elektrisch entgegengesetzt geladenen Zellflächen seiner gelösten Ionen beraubt, im normalen Leben eine Isolationsfähigkeit aufweisen könnte.**)

Die sehr hohe Dielektrizitätskonstante des Wassers ist eine der Hauptursachen seiner hohen galvanischen Leitfähigkeit als Lösungsmittel für Salze. Der theoretische Zusammenhang dieser feststehenden Tatsache ist hier nicht von Interesse, man kann

*) Le Blanc, Lehrbuch der Elektrochemie. Verl. Leiner, Leipzig 1911. 5. Auflage, pag. 126.

**) Diese paradoxe Idee, die für die Gesamthypothese ganz bedeutungslos ist und die nur zur Illustration des großen praktischen Unterschiedes zwischen statischer und galvanischer Leitung und Isolierung dienen sollte, hat einem Kritiker meiner „Elektrostatischen Zellkräfte" in der „Zeitschrift für Elektrochemie" Anlaß zu der Behauptung gegeben, ich wüßte nicht, daß Wasser kein Isolator ist, indem er die Stelle, losgelöst von ihrem Zusammenhang, seinen galvanisch denkenden Lesern zitierte.

die Entwicklung bei Nernst nachlesen, für uns genügt die Feststellung, daß sich experimentell ein direkter Parallelismus zwischen der dissoziierenden Kraft der Lösungsmittel und deren Dielektrizitäts-Konstanten unzweifelhaft ergeben hat.

Für die Nervenphysiologie wäre es sehr interessant, die Dielektrizitäts-Konstante der Achsenzylindermasse und der Markscheide zu kennen, ferner einen Ueberblick darüber zu gewinnen, wie sich eine Auflösung von Chloroform, Äther und anderen Narkotizis in diesen Substanzen elektrisch verhält, ob sie sich dissoziiert und dadurch die Achsenzylindersubstanz elektrolytisch leitend macht oder ob sie sich undissoziiert auflöst.

Nach dem Verhalten chemisch ähnlicher Stoffe wie Chloroform und Äther in Substraten von ähnlichem Chemismus wie Nervensubstanz ist es nicht gerade wahrscheinlich, daß eine erhebliche elektrolytische Leitfähigkeit bei der Auflösung resultiert. Das wird auch von meiner Hypothese keineswegs gefordert; vielmehr genügt eine sehr minimale Dissoziation und Leitfähigkeit, um ein Gleichgewicht zwischen so nahen Elektrizitäts-Kondensatorflächen zu einer langsamen Entladung zu veranlassen. Bei dieser langsamen Entladung wird naturgemäß der betreffende Stoff durch Elektrolyse allmählich aufgebraucht, an der Anode oxydiert, an der Kathode reduziert. Wenn die Menge des Narkotikums nicht zu groß ist für die vorhandenen Spannkräfte, so wird nach einiger Zeit die Isoliermasse zwischen den Kondensator-Flächen wieder von dem Narkotikum befreit, aber die elektromotorische Kraft des Systems bis zur Erholung durch Assimilation nach der Narkose etwas geschwächt sein. Bis auf das Detail der angeblich unveränderten Längsquerschnitt-Spannung muß elektrisch genau jener Zustand eintreten, den Biedermann in seiner Versuchsbeschreibung mitteilt.

Das Vorstehende ist keine Hypothese, sondern nur eine beispielsmäßige Variante, die zeigen soll, daß die Einfügung des elektrostatischen Tatsachenmaterials die scheinbar widerspruchsvollsten Erscheinungen doch etwas leichter zugänglich macht. Ich glaube im Innersten nicht, daß der Vorgang sich so ganz einfach abspielt, wie ja auch schon der starke Unterschied zwischen den beiden Polen, des Anelektrotonus und des Katelektrotonus zu erkennen gibt, der auf einen spezifischen Konvektionsstrom (Ionenströmung oder Elektronenströmung)

hindeutet, zumal wenn es richtig wäre, daß der Elektrotonus sich so langsam fortpflanzt wie ein natürlicher Nervenreiz. Vielleicht ist die Wirklichkeit eine Kombination beider Elektrizitätsübertragungen, der elektrolytischen und der Konvektionsströmung greifbarer Korpuskeln.

Eine solche Strömung, nicht nur im Vakuum und in Gasen, wurde bereits mehrfach beobachtet, sogar auch in Äthyläther und in anderen Flüssigkeiten.

Von Jaffé*) wurde Hexan durch wiederholte Destillation und Stromdurchgang weitgehend gereinigt. Die so gereinigte Flüssigkeit erinnerte in ihrem Verhalten an das eines dichten Gases. Das Ohmsche Gesetz war nicht mehr gültig, sondern man erhielt einen von der Spannung unabhängigen Sättigungsstrom. Der Strom wurde im wesentlichen durch radioaktive Strahlung hervorgerufen, die elektrolytische Dissoziation spielte keine in Betracht kommende Rolle. Die Leitfähigkeit erwies sich als unabhängig von der Temperatur.

Heptan, Petroläther und wahrscheinlich alle gesättigten Kohlenwasserstoffe verhalten sich ähnlich; davon zu unterscheiden sind die Lösungsmittel mit größerem eigenen elektrolytischen Leitvermögen. Man könnte sich vorstellen, daß auch bei diesen unter Umständen das Ohmsche Gesetz nicht mehr gültig sein und ein Sättigungsstrom sich einstellen wird, nämlich dann, wenn die Zahl der Ionen und ihre Nachbildung zu gering ist. Doch dürften bei den elektrolytischen Ionen größere Spannungen zur Erzielung solcher Wirkungen nötig sein. In der Tat zeigen reiner Äthyläther und Lösungen im Petroläther bei Spannungen von einigen Tausend Volt pro Zentimeter die Erscheinung annähernd gesättigter Ströme, während bei den geschilderten Versuchen mit reinem Hexan der Sättigungsstrom schon bei 200 Volt/cm erreicht wurde.

Ueber die Natur der Elektrizitätsträger im Hexan läßt sich noch wenig aussagen. Doch ist ihre Beweglichkeit neuerdings gemessen und nicht wesentlich verschieden von den Ionen im Wasser gefunden worden.

Nach alledem ist es wohl plausibel, daß eine ganz minimale Auflösung eines narkotischen Stoffes in der Nervensubstanz auf

*) Anm. d. Phys. (4) **28.** 326. 1909. **32.** 148. 1910. Physik. Zeitschr. **11.** 571. 1910.

die eine oder andere Art eine starke Erhöhung des Leitvermögens erzeugen kann, daß also die Narkose nur eine Isolationsschwächung, nicht eine Leitungsunterbrechung sein kann. Wie minimale Beimengungen im Wasser auf dessen Leitfähigkeit wirken, darüber einige Ziffern nach Hamburger:

Die Leitfähigkeit im reziproken Ohm beträgt:

Absolut reines Wasser	0,038	× 10[6]
Wasser aus Natureis	2,13	× 10[6]
Gewöhnliches destilliertes Wasser	49,2	× 10[6]
Schmelzwasser aus Kunsteis	137,0	× 10[6]
Marienbader Kreuzbrunn	10400,0	× 10[6]
0,73% Kochsalzlösung	11050	× 10[6]

Die Leitfähigkeit von Nerven in der Längsrichtung dürfte nach den bisherigen sehr unsicheren Messungen an querdurchschnittenen Kunstprodukten auf rund 30.000 Einheiten obiger Tabelle zu veranschlagen sein. Diese Ziffer, die aus der Vielheit der Gewebe des makroskopischen Nerven gewonnen ist, sagt natürlich nichts aus über die Isolierfähigkeit der isolierenden Substanzen, die auch nach der alten Anschauung im Nerven nicht fehlen können.

Es erübrigt noch anzuführen, was sich biochemisch über die Wirksamkeit gewisser Narkotika hat ermitteln lassen. Unsere Hauptkenntnisse auf diesem Gebiete verdanken wir Overton. Von ihm stammt die Feststellung, daß die Narkotika in um so kleinerer Konzentration wirken, je mehr sie lipoidlöslich sind. Lipoide nennt Overton eine Reihe von fettartigen Verbindungen, die sich in den meisten Zellmembranen, aber auch im Nerven, vorfinden und die Chloroform, Äther, Alkohol, Chloralhydrat etc. an sich ziehen und in sich auflösen. Er bestimmt ihren Teilungskoeffizienten, d. h. ihre Löslichkeitsverteilung zwischen Wasser und Öl und fand, daß die kritische Konzentration des Narkotikums in einer sehr deutlichen Beziehung zu ihrer Lipoidlöslichkeit steht. Die kritische Konzentration ist jene, bei der gerade die narkotische Lähmung eintritt. Für Froschblut und Äther beispielsweise ist sie 0,32%, für die Nerven also, an die nur ein Teil der Säftekonzentration herankommt, ist sie wahrscheinlich viel kleiner.

Meyer*) hat den Nachweis erbracht, daß sich mit der

*) Arch. für experimentelle Pathol. 46. 338. (1901) nach Hoeber.



Veränderung der Teilungskoeffizienten durch Temperatur-Einfluß auch die narkotische Kraft gleichsinnig ändert. Er fand bei Salizylamid kritische Konzentrationen von $^1/_{1200}$ bei 3^0, $^1/_{600}$ bei 30^0, Benzamid $^1/_{500}$ bei 3^0, $^1/_{200}$ bei 30^0.

Seither sind noch eine große Reihe weiterer Belege für die starke Wirkung minimaler Narkotikamengen beschafft worden.

Ich meine also, daß auch diese Ergebnisse der Overton-Schule dafür sprechen, daß der Nerv ganz entschieden als ein Elektrizitätsüberträger im drahtlosen Sinne aufgefaßt werden muß, soweit überhaupt die Elektrizität bei der Fortpflanzung natürlicher Reize in Betracht kommt, und daß jede Störung, in erster Linie der Reiz selbst, in zweiter Linie chemische Beeinflussung, elektrische Durchströmung, Induktionsschläge, Narkose, Absterben als Isolationsstörungen oder als Isolationsschwächungen angesehen werden müssen, nicht als Leitungsunterbrechungen, wie sie, halb im Unterbewußtsein, gegenwärtig allgemein aufgefaßt werden.

Bei der Narkose kommt noch ein beweiskräftiger Umstand hiezu, der die Unmöglichkeit der Idee einer „Leitungs"-Unterbrechung demonstriert, nämlich die Erholung und Reversibilität nach der Narkose. Ist es schon undenkbar, daß eine Beimischung von 1 Promille eines Stoffes zu einer ohnehin nur schwach elektrolytisch leitenden Hauptsubstanz eine galvanische Leitung einfach unterbricht, so ist es noch unmöglicher, sich vorzustellen, daß nach der Entfernung eines Teiles der Beimengung von einem Promille die ursprüngliche „Leitfähigkeit" wieder zurückkehrt.

Nein, durch diese minimale Lösung andersartiger, größtenteils kathodischer Stoffe in den Lipoidsubstanzen des Achsenzylinders oder der Markscheide kann eine schwache Leitfähigkeit nur erhöht, nicht plötzlich auf Null herabgesetzt werden!

DIE ACHSENFASERN ALS ISOLATOREN.

Ein Ding, das der oberflächlichen Betrachtung paradox erscheint und doch nichts Anderes ist als eine platte Selbstverständlichkeit, ist die sicher sehr große Isolationsfähigkeit des Axons. Es muß daran erinnert werden, daß die gegenteilige Auffassung kein anderes Experiment zu ihrer Stütze heranziehen kann als die übrigens nicht bedeutende Differenz der Leitfähig-

keit zwischen querer und längsgerichteter Durchströmung des Nerven. Nun ist aber der Nerv in der Längsrichtung von Flüssigkeitsstreifen mit Elektrolyten, von Lymphspalten, von den Markscheiden, von der Schwannschen Scheide durchsetzt, daß er selbstverständlich in der Längsrichtung besser leitet als bei der queren Durchströmung.

Es ist eine ganz merkwürdige Sache, daß man sich darauf verlegt, die bessere elektrische Leitfähigkeit einem ionenarmen Eiweißzylinder zuzuschreiben, der von elektrisch leitenden Flüssigkeitssäulchen umgeben ist. In Wahrheit zeigen alle Bilder und alle mikrochemischen Untersuchungen übereinstimmend, daß in den Achsenfasern bisher noch keine Ionen nachgewiesen sind, während die hohe Leitfähigkeit der Gewebssäfte längst untersucht und als eine zuverlässig konstante Größe gefunden worden ist, die sich nach den verschiedensten äußeren Eingriffen rasch und automatisch auf ihre normale Konstanz einstellt. Ferner haben die mikrochemischen Untersuchungen Ionen in den Scheidengrenzflächen nachgewiesen.

Ein Blick auf die ontogenetische und phylogenetische Entwicklung der Nervenfaser läßt außerdem erkennen, daß die elektrische Isolierung keinesfalls von den verschiedenen Umhüllungen der Nerven übernommen werden kann, abgesehen davon, daß deren Isolationsfähigkeit nicht zu verstehen wäre, denn viele Nerven erscheinen sowohl bei den niederen Tieren, als in den Anfangsentwicklungsstadien der höheren Tiere, einige auch bei den erwachsenen Tieren völlig marklos und ohne jede erkennbare Umhüllung. Wie also wäre eine Uebertragung eines elektrischen Reizes möglich, wenn die höhere Leitfähigkeit in den Achsenfasern selbst lokalisiert wäre!

Die Einwände, die man vom Standpunkt der gegenwärtigen physiko-physiologischen Methoden gegen die Isolatorennatur der Axone vorbringen kann, sind nicht allzu schwer widerlegbar. Wie alle veränderten Auffassungen aber hat sie in sich neue Schwierigkeiten, die vielleicht erst durch die fortschreitende experimentelle Arbeit geklärt werden können. Es ist schon erwähnt worden, daß in den lebenden Axon Methylenblau eindringt, die viel positiveren, leichter beweglichen, schneller permeierenden Kalium- und Natriumionen aber anscheinend nicht. Dieser Umstand und die Tatsache, daß in abgeschnittenen, dege-

nerierenden Nerven sich die Axone immer noch anscheinend deutlich kathodisch färben und daß selbst zertrümmerte Bruchstücke ihre elektrische Polarität zu behalten scheinen, ist ein Widerspruch in sich, der mit anorganischen Erfahrungen nicht zu erklären ist. Die Masse des Axons kann doch unmöglich aus einem Stoff etwa wie Harz oder wie Kautschuk oder wie reines Isolieröl bestehen!

Uebrigens hat man unter starken Spannungen auch kleine Ionen durch Harz und Glas eindringen gesehen. Und selbst wenn der Achsenzylinder ein Isolationsstoff dieser Art wäre, wie kann er seine Eigenladung wochenlang in den Trümmerstücken des degenerierten, von Elektrolyten erfüllten Nerven bewahren?

Die Bilder, die die Golgischen und Cajalschen feinen Methoden im letzten Jahrzehnt von der Durchschneidung und Regeneration der Nerven geliefert haben, zeigen andererseits, daß manche gedankliche Schwierigkeiten der neuen Betrachtungsweise durch die neueren besseren Methoden und die schärferen Bilder ihre Beseitigung finden dürften. Wenn nämlich der Nerv seine physiologische Aufgabe der Bereitstellung von Reiz-Entladungen voll erfüllen soll, so muß er (wie im übrigen jede lebende Zelle, aber in spezifiziertem Maße) eine Kondensator-Struktur erkennen lassen, d. h. eine Polarisierung von Flächen zwischen Isolatoren, durch welche eine gewisse, im Verhältnis zur Dimension sehr große Kapazität erzeugt werden kann, wie bereits mehrfach betont worden ist. Es muß sich, — nach einem geläufigen Bilde, — in den zentralen Endorganen der Nerven, vielleicht auch seitlich angeschlossen in sogenannten unipolaren Zellen eine ebene oder kugelige Flächenentfaltung erkennen lassen, in der ein erhebliches Quantum elektrostatischer Energie akkumuliert werden kann. Auch bei den Wachstumserscheinungen, bei denen ebenfalls starke Bewegungsimpulse der auswachsenden Nervenfaser zu erwarten sind, mußte man kolbige oder noch besser kugelige Endflächen erwarten, mit denen die Zelle peripheriewärts vordringt. Daneben sind Endbäumchen mit Spitzen an solchen Stellen zu erwarten, an denen Impulse von Nachbarganglien oder Assoziationszellen hemmungslos übertragen werden sollen.

In dieser Richtung haben die neuesten Forschungen der Nervenhistologie meine Erwartungen weit übertroffen, ja, ich

hatte die Genugtuung, daß manche Bilder, die mir für die elektrostatische Wachstumshypothese nicht paßten, durch die späteren Forschungen ganz von selber berichtigt wurden. So z. B. bildet Cajal nach Golgis Methode Wachstumskeulen der Nerven aus dem Rückenmark des viertägigen Hühnerembryos ab,*) die offenbar infolge der Bildung von künstlichen Schollen, Spitzen, Ausziehungen, seitlichen Anhängen unmöglich als statische Kondensatoren gelten konnten. Mit seiner eigenen neuen Silbermethode hat dann Cajal selbst später Bilder geliefert, in denen die Keulen verbreitert und abgestumpft sind, so wie sie elektrostatisch erwartet werden mußten. Wenn ich so Schritt für Schritt immer wieder darauf geführt wurde, daß die neuen Experimente die Tatsachen so darstellen, wie sie von diesem Gesichtspunkte aus prophezeit werden mußten, so wurde ich immer sicherer, daß mein Weg der richtige ist.

Am meisten entzückt haben mich die Erfolge der neuen Cajalschen Silber-Imprägnierungmethoden an Nerven und Ganglien im Hinblick auf die nunmehr sicher feststehenden abgerundeten (nicht zugespitzten) Fibrillenendigungen in den Spinalganglien. In allen Handbüchern der Histologie und der Physiologie bis um die Jahre 1910 oder 1912 finden sich Darstellungen der Verbindungen zwischen Zentralganglien und Axonen, die in irgendeiner Form zugespitzte bäumchenartige, schollige oder kantige Zuleitungen der Nerven zu ihren Zentralganglien darstellen. Das war eine erhebliche Schwierigkeit für die Hypothese der Kondensator-Struktur des Nerven. Man kann sagen, daß eine Konfiguration, die in Spitzen, Endbäumchen und Kanten ausläuft, gerade das Gegenteil eines Behälters für statische Elektrizität ist. Zuerst dachte ich mir, daß die Endzähnchen oder -spitzen den leichten Uebergang der statischen Elektrizität gegen die erste hintereinander geschaltete Zelle erleichtern sollen, daß also beispielsweise peripherer Nerv, Zentralganglien und Transfertzone des Rückenmarks einen Kondensator bilden müßten. Diese Idee mußte aber sofort als unbrauchbar beiseite gelegt werden, weil die Zentralzelle und ihr Axon sich genau gleichsinnig lebend und fixiert färben, wie ihre periphere Endigung. Wenn aber die Achsenfasern ihre kathodische Ladung fortwährend in einem und demselben Richtungssinne nach der

*) Heidenhain, Plasma und Zelle. 2. Bd. 2. p. 792. Jena 1911.

Zentralstelle sowohl als nach der peripheren Endigung manifestieren,indem sich nicht etwa in der Zentralzelle die Axone hell und in der Muskelzelle die Axone dunkel tingierten, so mußte die kathodische Ladung in beiden Enden durch Platten, Flächen, Kolben oder dergl. kondensatorisch zurückgehalten werden, was aber bis in die letzten Jahre wieder absolut nicht zu den histologischen Bildern gepaßt hat.

Man kann sich also vorstellen, mit welcher Genugtuung ich in dem prächtigen Buche M. Heidenhains „Plasma und Zelle"*) die neueren Bilder erblickte, die mir die Gewißheit gaben, daß die Achsenfasern nicht spitz in die Ganglienzellen einliefen, sondern in Schleifen sich zurückbogen und äquatoriale Flächenkreise bildeten, wie ich mir sie schöner für die Kondensatorwirkung von statischen Flächen hätte nicht ausmalen können.

Das erste Bild ist eine Vitalfärbung der Spinalganglienzelle der Katze mit Methylenblau, die schon aus dem Jahre 1896 von Dogiel stammt und bereits Flächen der Endausbreitung des Axons im Spinalganglion erkennen läßt. (Heidenhain II. 2, pag. 839). Auf der nächsten Seite findet sich bereits eine aus dem Jahre 1897 stammende Zeichnung von Heidenhain selbst, die dieser in unbegreiflicher Bescheidenheit liegen ließ, weil sie ihm gegen Dogiel und Bühler zu wenig Neues zu bieten schien. Diese Zeichnung einer Spinalganglienzelle des Frosches enthält jedoch eine deutliche Wiedergabe der Aufrollung des zentralen Achsenfasernbündels in spiralige Kreise, die dem Kern und den Tigroidschollen genau gegenüber liegen in einer idealen Kondensatorstellung, die eine maximale statische Kapazität des vorhandenen Zellraumes ergeben muß. In den folgenden Seiten (Fig. 523, 524, 525) ist nach Schnittserien der Faserverlauf schematisch dargestellt, in einer Weise, die es nicht bezweifeln läßt, daß die alte Kernleiter-Vorstellung ganz das Gegenteil des histologischen Befundes ist und daß eine Elektrizitäts-Uebertragung nur möglich ist in der einen assimilativen Richtung durch Aufladungswirkung eines Kondensator-Systems oder in der dissimilativen Gegenrichtung als kondensatorische Entladung durch Reize.

*) II. Bd. 2. Heft. Jena 1911. p. 838 ff.

DIE REIZLEITUNG IN DEN ISOLIERFASERN.

Wie hat man sich nun vorzustellen, daß ein Nervenreiz übertragen wird? Auf die einfache Reizleitung scheinen alle Vorstellungen, auch die ältesten mit dem Axon als isoliertem Metalldraht so ziemlich zu passen, die Hauptschwierigkeit liegt bei der reflektorischen Uebertragung von Reizen.

Man hätte sich diese etwa folgendermaßen vorzustellen: Sowohl die motorischen, als die sensiblen, spinalen und sympathischen Fasern werden durch Ernährung, Kreislauf und Atmung gleichsinnig kathodisch aufgeladen. Das heißt der motorische Nerv sowohl als auch der sensible Nerv erhalten durch die Energetik der Ernährungszellen von der Peripherie aus kathodiesche Impulse derselben Richtung. Auch in den Kondensatoren des Zentralnervensystems wird den Nervenzellen während der bloßen Assimilation elektrische Energie unablässig aufgeladen, so daß die kugeligen oder kolbigen Flächen in der Zentralzelle sowohl, als in den Muskelfasern und sensiblen Endorganen fortwährend sich in einem Zustand maximaler kondensatorischer Aufladung befinden. Zwischen den Endplatten scheint sich eine Masse zu befinden, die während des Ruhezustandes (besser vielleicht Erholungszustandes) durch die entgegengesetzte Spannung der Kondensator-Belage aller Ionen entblößt ist und die Entladung einstweilen isolatorisch verhindert.

Ein solches System muß sich etwa so verhalten wie der Kohärer in der drahtlosen Telegraphie. In dem Augenblick, in dem eine elektrische Welle ihn trifft, wird er seine Dielektrizitätskonstante (d. i. seine statische Isolierfähigkeit) so ändern, daß die Kondensatoren-Ladungen sich entladen, wodurch eine Ionenverschiebung, oder eine Strahlwirkung vorläufig unbekannter Art in dem ganzen im Konnex befindlichen System ausgelöst wird. Im Falle der sensiblen Reflexzuckung geschähe also etwa folgendes:

Im sensiblen Endapparat geschieht z. B. am einfachsten durch einen Druck oder durch chemische Änderungen eine Annäherung oder Widerstandsänderung des Kondensator-Systems mit Entladung der Elektrizität. Hierauf folgt zentralwärts eine Verschiebung chemischer oder elektrochemischer Natur, eine Wanderung von Ionen oder Elektronen, über die eine Spezialannahme im Au-

genblick noch nicht möglich ist. Diese unbekannte Verschiebung langt im sensiblen Zentralganglion an, muß dort, wenn nicht direkt, so sicher indirekt durch chemische Verschiebung eine Elektrizitätswelle auslösen, die in der Zone des Transferts durch Endbäumchen in die motorische Nervenzelle übergreift, dort eine Elektrizitätsschwankung gegen die Peripherie hin erzeugt, die das Kondensator-System der quergestreiften Muskeln zur Entladung bringt.

Ueber die Art der Fortpflanzung im Nerven unterlasse ich es, eine bestimmte Annahme zu machen und hebe nur hervor, daß die Feststellung der Isolatornatur der Achsenfasern die Möglichkeit gibt, zwischen den verschiedensten Uebertragungsmechanismen zu wählen. In einer Faser aus Isoliermasse könnte man direkt elektrische Wellen fortpflanzen, (wogegen jedoch die Langsamkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit spricht); man könnte die Annahme eines Konvektionsstroms korpuskulärer Materie nach Art der Kanalstrahlen annehmen, man könnte endlich annehmen, daß während der assimilatorischen Erholungsperiode ein sehr schwacher Elektronenstrahl von der Zentrale gegen die Peripherie strömt und daß das Aufhören dieses Strahles jene Elektrizitätsverschiebung oder jene Wellen erzeugt, die die Kondensatoren an den Endpunkten entlädt.

Die letztere Vorstellung, die an zahlreiche Tatsachen anknüpft und viel Bestechendes hätte, birgt natürlich in sich manche Schwierigkeiten. Es wird ein wenn auch sehr schwacher Ruhestrom des Nerven verlangt, der bisher sich nicht auffinden ließ, namentlich an den allein in Betracht kommenden unverletzten normalen Nerven. Es wird ferner verlangt, daß eine Reflexwelle nur e i n e Reflexzuckung auslöst, während in Wirklichkeit eine tetanische Erregung mit 10 bis 20 Einzelreizen reflektorisch ausgelöst zu werden pflegt. Man müßte also neue Zusatzannahmen machen, z. B. daß eine einzige sensible Welle gleichsam eine Bahnung der Entladung motorischer Reize erzeugt, oder daß mitbetroffene, seitlich angeschlossene unipolare Akkumulator-Kondensator-Ganglien auf das einmalige Ansprechen mit mehreren Wellenimpulsen antworten oder dergl., kurz man müßte sich in Kombinationen verlieren, für die bisher alle experimentellen Unterlagen fehlen.

Die elektrostatische Betrachtung der Nerven-Reizleitung behält auch noch andere Unklarheiten. Aber diese sind nicht zu vergleichen mit den Konfusionen, welche durch die Idee des Nerven als „Kernleiters", die merkwürdigerweise auch von einigen führenden Köpfen der physikalischen Chemie übernommen wurde, angerichtet worden ist. Man stelle sich einmal im Ernst einen Kernleiter vor, der sich im Experiment bisher als die so ziemlich stärkste makroskopisch faßbare Kathode des Körpers erwiesen hat. Dieser Kernleiter müßte doch alsbald alle Natrium-, Kalium- und Ammoniakmoleküle des Körpers an sich ziehen und irgendwohin fortleiten. Ein normaler starker Fortleitungsstrom ist aber sicher nicht in ihm enthalten; und wie soll er seine Elektropolarität bewahren mit einer ein Zehntausendstel Millimeter dichten Schicht aus Elektrolyten, die mit der Ernährungsflüssigkeit im direkten Kontakt steht, wenn er selbst ein Leiter ist? Der Gedanke ist in seinen einfachsten Konsequenzen ganz absurd!

Demgegenüber ist die Schwierigkeit, daß auch die neuesten und feinsten Silberpräparate immer noch zugespitzte Endbäumchen ausfärben, die ebenfalls kathodisch gegen ihre Umgebung polarisieren, unbedeutend. Abgesehen davon, daß jene Figuren jenseits der Sichtbarkeitsgrenzen des Mikroskops vielleicht doch in flächenhafte Elemente oder runde Schleifen sich werden auflösen lassen, so müßte eben schließlich für jene Gebilde die Vorstellung der geladenen Kondensatoren fallen und jenen Punkten der sofortige Uebergang der schwächsten Elektrizitätspotentiale zugegeben werden, die wahrscheinlich erst bei der nächsten Umschaltstelle auf ihre flächenhafte Aufhalte- und Speicherstation stoßen werden, so daß dann gewissermaßen ein zweigeteilter oder mehrfach geteilter Kondensator existieren würde, der nach außen als einfaches Kondensator-Element zu wirken hätte.

Ueber diesen Punkt wird am ehesten dadurch ein wenig fester Boden gewonnen werden, daß man intravital mit annähernd körpereigenen Stoffen, Jod oder Eisen die mikroskopische Elektrizitätsverteilung untersucht und hierauf in Gefrierschnitten oder auch am fixierten Material die feinere Verteilung der zuerst grob erhaltenen Elektro-Histologie weiter verfolgt. Soweit es sich bisher beurteilen läßt, würde sich aus den bisherigen Experimenten ergeben, daß die Achsenfaser der Nerven im Gegensatz zu anderen Zellelementen ihre charakteristische Lebensladung nicht

umkehrt, sondern nach den gewöhnlichen Fixationen in sehr vielen Fällen beibehält. Es sieht manchmal nicht nur bei den Nerventinktionen, sondern auch bei den Resultaten physiologischer Versuche mit Zellgruppen, die an Nerven angeschaltet sind, so aus, als hätten viele z. B. sekretorische oder Resorptionsnerven, die Funktion, gleichsam als Nebenschluß-Akkumulatoren bestimmt gerichtete elektrische Potentiale konstant zu erhalten, die der natürlichen Umkehrtendenz der Zellakkumulatoren entgegenzuwirken hätten.

Es ist sehr schwer, aus der Art, in der gegenwärtig histologische Bilder veröffentlicht werden, zutreffende Schlüsse über Art und Richtung der Elektrizitätsladung zu ziehen. Für solche Schlüsse ist es natürlich grundlegend wichtig, ob eine Färbung, insbesondere eine Methylenblaufärbung am lebenden oder am fixierten Gewebe erzielt worden ist, bei fixierten, ob an frischen oder an ganz abgestorbenem Material, die Tatsache, ob Regressivfärbung vorliegt oder direkte Färbung, wie überhaupt das Zeitmoment eine große Rolle spielen muß, bei der Art, wie eine Elektrizitätsladung sich entlädt. So z. B. sieht es aus, als ob die nach Absterben der Gewebe erzeugten Färbungen diffuser Art nicht etwa davon herrühren, daß der Chemismus der Zelle sich diffus egalisert (weil ja die hochkolloidalen Stoffe, an denen nach der chemischen Tinktionstheorie die Farbe haftet, sich sehr schwer durch Membranen und differenzierte Eiweiß-Gallerten verbreiten könnten) sondern davon, daß nach dem Tode die vorhandenen Ladungen, die durch den Ernährungskreislauf nicht fortwährend neu aufgeladen werden, sich entladen und nach dem Aufhören der differenten Elektrizitätsverteilung in der Zelle sich diffus färben.

Seit zwanzig Jahren werden in den histologischen Atlanten fast nur mehr Fixationsbilder und keine Lebendfärbungen wiedergegeben.

Nur die besonders gewissenhaften Morphologen machen, wenn sie nicht gerade eine neue Technik beschreiben, Andeutungen über die Zeitfolge der Färbung und die Art der Fixation. Bei den Achsenfasern der Nerven, bei denen so viele differente Techniken die kathodische Färbung ergeben, scheint es nun, daß ihre normale Ladung gegenüber dem Gewebe, das sie dirigieren (vielleicht auch gegenüber dem normalen Ernährungsgewebe) sich im Leben und im Tod gleichsinnig auflädt, nämlich kathodisch.

Dann wäre aus dem färberischen Verhalten noch Manches hypothetisch abzuleiten, wenn man sich nicht scheuen müßte, physikalische Entdeckungen und Bezeichnungen, die erst 15 oder 20 Jahre alt sind, schlankweg auf biologische Vorgänge anzuwenden. Wenn einer z. B. andeuten wollte, daß zur Ueberleitung von Stoffwechselenergie über Nerven, Muskelfibrillen, Cilien oder Epithelstäbchen nicht unbedingt ein Stofftransport über die Flimmerhaare oder über die feinsten Fibrillen angenommen werden müßte, sondern daß eine Elektronenströmung gerichteter Art (im Gegensatz zu einer diffusen Strömung) dafür ausreicht, so macht dies in der Physiologie einen phantastischen Eindruck.

Diesem Eindruck liegt unbewußt der anthropozentrische Irrtum zugrunde, irgendeine neuentdeckte Abart der Energieströmung sei dem Apparat der natürlichen Schöpfung noch unbekannt. Das gerade Gegenteil ist aber richtig. Wir werden in Biologie und Physiologie einen ganz gewaltigen Schritt nach vorwärts machen, bis die anorganischen Physiker einige der unerklärlichsten Vorgänge der Molekülphysik, die Spektrallinien, die molekulare Magnetochemie, die Anomalie der starken Elektrolyte werden vollkommen aufgeklärt haben, und bis überhaupt zwischen der Elektronenphysik und der physikalischen Chemie eine vollständige Brücke hergestellt sein wird.

DIE WIRKUNG DER ROENTGEN- UND RADIUMSTRAHLEN.

Eine Tatsache, die offensichtlich nicht in die rein biochemische Auffassung der Lebenstätigkeit paßt, ist die schädigende und bei größeren Dosen absolut tötliche Wirkung der Bestrahlung lebender Zellen. Hier haben wir eine rein energetische, immaterielle Wirkung einer Kraft, von der außerhalb der Zelle noch niemals die leisesten Spuren einer chemischen Wirkung beobachtet wurde, die über die bloße Lichtwirkung hinausging.

Dagegen ist die starke Wirkung dieser Elektrizität entladenden Strahlen ein neuer Beleg für die Kondensatornatur des lebenden Gewebes. Gleich nach der Entdeckung dieser Strahlen und ihrer Eigenschaft, angesammelte statische Ladungen zu zerstreuen, erwartete ich, daß die Schädigung der Zellen durch sie

eintreten müsse und es wäre ein direkter Gegenbeweis gegen meine elektrostatische Annahme, wenn sie ausgeblieben wäre.

Schon früher war es bekannt, daß Sonnenstrahlen, insbesondere die kurzwelligen ultravioletten Strahlen, lebende Zellen schädigen und Bakterien und Sporen abtöten. In Indien wird das Bettzeug einfach an die starke tropische Sonne gegeben, um das Ungeziefer zu töten, im Hochgebirge, wo die sonst von der Atmosphäre absorbierten ultravioletten Strahlen stärker sind, entsteht auf ungeschützten Hautstellen des Menschen Gletscherbrand, und diese, die Gewebe-Elektrizitäten entladende Kraft geht parallel mit der im Laboratorium beobachteten ionisierenden, also Elektrizität entladenden Eigenschaft der ultravioletten Strahlen. Noch viel kurzwelliger sind die β- und γ-Strahlen, die wir aus den Roentgen- und Radiumlaboratorien kennen. Ihre ionisierende Kraft ist enorm und dem entspricht auch die starke, bei großen Dosen tötliche Wirkung auf alle lebenden Gewebe der Tiere und Pflanzen.

Es seien nur einige Beispiele nach Hertwigs Allgem. Biologie*) aufgezählt.

Nach den ausgedehnten Untersuchungen von Koernicke und Guilleminot auf botanischem Gebiet keimen Samenkörner, die vor der Keimung bestrahlt wurden, nur langsam aus und sterben, im Unterschied zu den Kontrollen, entweder bald ab oder liefern nur kleine, schwächliche und verkümmerte Pflänzchen. Bei stärkerer Dosis geht die Keimfähigkeit überhaupt ganz verloren. Bei Bestrahlung der Samen während der Keimung wird das Wachstum der jungen Pflanzen verlangsamt, doch nimmt die schädliche Wirkung der β- und γ-Strahlen in demselben Maße ab, als sie bei schon älter gewordenen Pflänzchen angewandt werden.

Zu dieser Erscheinung muß hervorgehoben werden, daß die Samen lufttrocken bestrahlt wurden, weil feuchte Samen sich überhaupt nicht halten. Nun bedenke man, daß in einem ganz trockenen, festen Substrat, das keinerlei flüssige oder halbflüssige Teile mehr enthält, die Entladungsstrahlen eine so starke und nachhaltige Wirkung erzeugen. Hier sind nun einmal ganz klare Tatsachen, bei denen jeder Einwand einer chemischen Wirkung ausgeschlossen ist! Keiner von uns hat jemals bei festen Körpern

*) Jena 1912. p. 579 ff.

eine chemische Reaktion beobachtet. Wenn wir uns also nicht einem zwecklosen Mystizismus hingeben wollen, so müssen wir sagen, daß die kurzwelligen Strahlen, von denen uns nichts bekannt ist als ihre große Durchdringungsfähigkeit und ihre entladende Wirkung auf elektrische Potentiale, in den ganz trockenen Samenzellen elektrische Ladungen zerstreuen.

Es gäbe einen einzigen Einwand gegen diese Beweisführung, nämlich daß die längeren Wellen, die Lichtstrahlen, in schwächerem Maße auch die Wärmestrahlen hie und da auch trockene Substrate teils direkt zersetzen, teils ihre Zersetzung vorbereiten. Dem ist aber entgegenzuhalten, daß das Licht, das solche photochemische Zersetzungen hervorbringt, auch nach monatelanger Einwirkung nicht die Samen so schädigt und daß ein gewisses Quantum strahlender Energie in Wärmeform später zur normalen Entwicklung der Samen sogar unentbehrlich ist.

Das, was die trockenen Samen schädigt und tötet, sind ganz allein die kurzwelligen Strahlen, also jene, deren Hauptkennzeichen ihre starke Entladungswirkung auf isolierte statische Elektrizität ist.

Die tierischen Zellen verhalten sich ähnlich. Nur wird man bei ihnen, die aus flüssigen und halbflüssigen Zellteilen bestehen, den Einwand chemischer Reaktionen nicht so eklatant ausschließen können.

In Furchung begriffene Froscheier — wieder nach Hertwig — die mit schwachen Radiumpräparaten auch nur kurze Zeit (5—15 Minuten) bestrahlt worden sind, entwickeln sich zwar noch tage- und wochenlang weiter, aber in sehr verlangsamtem Tempo und bleiben im Vergleich zu gleichaltrigen Kontrolltieren kleiner. Die volle Wirkung der Bestrahlung tritt erst eine Zeit nach ihrer Anwendung, nach einem Stadium der Latenz, zutage und bleibt dann in ihren Folgen bestehen. „La plante paraît“; wie Guilleminot sich ausdrückt, „incapable de réparer par la suite le mal causé dès les premiers stades.“ Tierische Embryonen werden und bleiben pathologisch. Besonders einzelne Organsysteme werden auffallend stärker von der Schädigung betroffen, wie das Nervensystem und die höheren Sinnesorgane, die Muskulatur, Blut und Blutgefäße.

Aus ausgedehnten Versuchen am ausgebildeten Tier und an Menschen geht die interessante und wichtige Tatsache hervor,

daß die Wirkung der Radium- und Roentgenstrahlen auf die Gewebe eine „selektive" ist, insoferne einige Zellen und Gewebe in einem höheren Grade als andere gegen die Bestrahlung reagieren. Im allgemeinen scheinen die Zellen um so empfindlicher zu sein, je mehr sie den Charakter von Keimzellen besitzen und sich durch Teilung rascher zu vermehren die Neigung haben. Bei Radiumentzündungen der Haut werden in erster Linie das Rete Malpighi, die äußeren Wurzelscheiden und der Bulbus des Haares verändert gefunden. Besonders aber sind es zwei Gewebe und Organe des Körpers, welche am frühzeitigsten und intensivsten durch β- und γ-Strahlen geschädigt werden. 1. Die männlichen und weiblichen Keimdrüsen, 2. Blut und Lymphe mit den dazu gehörigen hämatopoetischen Organen.

Bei Ratten, Kaninchen etc., bei denen die Hodengegend längere Zeit bestrahlt wurde, trat bald vollständige Sterilität ein (Seldin, Bergonié und Tribondeau, Barratt und Arnolo). Die spezifischen samenbereitenden Elemente, Spermatogonien und Spermatozyten, erwiesen sich mikroskopisch als vollständig zugrunde gegangen. Schon eine Bestrahlung von 6 Stunden genügt zu dauernder Sterilität. Eine durch X-Strahlen erzeugte Sterilität ist auch bei Arbeitern und Arbeiterinnen der Roentgenindustrie schon beobachtet worden.

Die zweite, durch β- und γ-Strahlen leichter beeinflußbare Gewebsgruppe sind Blut, Lymphe, Milz, Lymphdrüsen und Knochenmark. Wenn man ein kleines Säugetier längere Zeit ganz bestrahlt, so läßt sich bald eine große Verminderung in der Zahl der weißen Blutkörperchen beobachten. Die infolge der Bestrahlung des Blutes eintretende Verarmung an Leukozyten bezeichnet man als Leukopenie.

Zu der Aufzählung der Gewebselemente, die gegen Entladungsstrahlen besonders empfindlich sind, ist zu bemerken, daß diese großenteils jene Gewebsarten sind, die wie die Nerven und Muskeln direkt die höchsten Elektrizitäts-Ladungen erkennen lassen, oder z. B. jene Elemente der Haut, die in Unnas Bildern der Reduktions- und Oxydationsorte am stärksten hervortreten.

In den Geschlechtszellen ist aus physiologischen Gründen schon seit zweihundert Jahren der Sitz starker Elektrizitätsladungen vermutet worden, wofür auch verschiedene Tinktionen

zu sprechen scheinen.*) Ebenso fallen bei gewissen Vitalfärbungen Lymphdrüsen und andere Blutzellen bereitende Organe durch eine starke Polarität auf, die wahrscheinlich von starken Elektrizitätsladungen herrühren.

Dagegen fehlen in der Aufzählung der besonders empfindlichen Gewebe einige Zellsorten, die nach Vitalfärbungen sich als starke Elektrizitätspole manifestieren, z. B. die Kupfferschen Sternzellen der Leber.

Im übrigen stehen die Resultate der Bestrahlungsexperimente in sehr guter Uebereinstimmung mit dem, was nach den Tinktionen und makroskopischen Elektrizitätsmessungen über die Elektrizitäts-Verteilung im Organismus zu vermuten ist.

HAUT- UND DRÜSENSTRÖME.

Haut und Speicheldrüsen gehören zu jenen Geweben, deren Elektropolaritäten von den Physiologen ziemlich genau erforscht worden sind, soweit sie sich mit nicht mikroskopischen Meßapparaten greifen ließen. Im allgemeinen ordnen sich die experimentellen Ergebnisse ziemlich gut in das Bild ein, das die histologischen Färbungen ergeben.

So z. B. bezeichnet Ehrlich die Zungenschleimhaut als einen starken Reduktionsort (also elektrisch übersetzt als Kathode), der Methylenblau reduziert. Außerdem färbt sie sich wie fast alle anderen tierischen Somazellen lebend mit basischen Farbstoffen. Dementsprechend hat sie einen ziemlich starken von den Elektrophysiologen als „einsteigend" bezeichneten Strom. Dieser wird z. B. bei der Froschzunge in der Weise konstatiert, daß mit zwei Elektroden gleichzeitig von der oberen und der unteren Zungenfläche metallisch abgeleitet wird und die Stromrichtung im künstlichen Schließungsdraht gemessen wird. Da die obere Zungenfläche relativ mehr Schleimdrüsen und Ausführungsgänge enthält als die untere, so fließt im Metalldraht ein Strom von der Zungen-Unterseite zur Zungen-Oberseite. Aus diesem schließen die Physiologen auf einen inneren „Strom" von

*) Siehe im Pflanzenteil „Elektropolarität der Eizelle".

der Zungen-Oberseite zur -Unterseite, aus keinem anderen Grunde, als weil sie an der Analogie des geschlossenen Stromes festhalten. Diese Idee, der man eigentlich nicht einmal den Charakter einer Hypothese beilegen kann, weil doch sicher kein „Strom“ dieser Stärke durch die lebende Masse der Zunge mit ihren Tausenden Zellen, Isolationen, Nerven, Muskeln, Gefäßen einfach hindurchfließen kann, sondern höchstens um ihre Außenfläche herum, ist auf der Nichtberücksichtigung der Grundgesetze der Elektrizitätslehre aufgebaut. Selbst wenn ein solcher Strom aus dem Anlegen der beiden Elektroden resultierte, ist er ein Kunstprodukt und ist physiologisch von geringem Interesse. Obzwar er auf Spuren von Chloroform und Äther mit einer negativen Schwankung reagiert, auf Sauerstoffabsperrung und Kohlensäurezufuhr reversibel geschwächt wird, also sehr gut in mein Schema paßt, glaube ich diese Tatsache doch nicht für meine Annahme ins Feld führen zu können. Bei dem heutigen Stand der Elektrohistologie ist es zwecklos und würde nur zu phantastischen Kombinationen führen, wenn man aus so zufälligen Ableitungen von sich erneuernden differenten Ladungen mehr geschlossen würde als die Tatsache, daß die Zungenoberseite des Frosches sich regulär stärker negativ auflädt als die Zungenunterseite mit ihren spärlicheren Drüsen und daß Kältewirkung diese Erscheinung sistiert oder sogar das Elektrizitätsgefälle umkehrt.

Ganz ähnlich aber viel schwächer wie die Zunge verhält sich die Haut der Amphibien, Fische, aber auch die Haut der höheren Wirbeltiere. Sehr bemerkenswerte komplizierte bis vierphasig schwankende Resultate ergaben Versuche mit „entwässerten“ Fröschen, die durch Einspritzung von Glyzerin und dergl. eine absolut trockene Haut hatten. Indessen sind die Wege der Elektrizität in so abnormalen Tieren bei einem so komplizierten Substrat wie bei der Haut unübersehbar, so daß für die nächste Zeit wenig Aussicht besteht, irgend etwas aus solchen Versuchen abzuleiten, zumal an der Artefakt-Methode der Ableitung durch zwei Elektroden festgehalten wurde, die verschiedene Hautstellen berührten, die normalweise von einander elektrisch isoliert sind, nämlich isoliert für so schwache Ströme, wie sie hier gefunden wurden.

Von besonderem Interesse für die elektrochemische Stoffwechselhypothese sind naturgemäß die älteren Beobachtungen über die elektromotorischen Erscheinungen an der Magenschleimhaut. Während die meisten anderen Drüsen alkalische Säfte erkennen lassen (oder „sezernieren", wie man es physiologisch-chemisch gewöhnlich ausdrückt), mußte bei den Belegzellen der Magenschleimhaut, den vermuteten Bildungsorten der Magensalzsäure, eine anodische Polarisation erwartet werden. Es mußte also, zumindest bei der Verdauung und beim Auftreten des stark sauren Magensaftes, eine relative Elektropositivität der Magenschleimhaut zu erkennen sein. Rosenthals*) Versuche schienen dieser Auffassung nicht zu widersprechen. Er leitete natürlich zweipolig ab, und zwar einerseits von der inneren Magenwand, andererseits von der Muskularisschicht, wobei ein kräftiger „einsteigender" Strom hervortritt. Dieses magere Ergebnis seiner Versuche besagt naturgemäß nur, daß die Muskularis (die nur rein äußerlich mit der inneren Magenoberfläche verbunden, elektrisch sicher mehrfach isoliert und chemisch-physiologisch ohne direkte Beziehung zu den Drüsenausgängen ist), daß die Muskelhaut also elektronegativer ist als die innere Schleimhaut, also jene relativ elektropositiver.

Die Magenschleimhaut ist eine jener wenigen Stellen des Körpers, in der während der Verdauungstätigkeit selbst der fanatischeste Elektrostatiker einen galvanischen Kettenstrom vermuten mußte, es war also von sehr großem Interesse, die Veränderung der Elektrizitätsladung oder des Stromes während der Verdauung zu untersuchen, aber natürlich nicht des Artefakt-Stromes zwischen zwei im normalen Leben ganz isolierten Hautschichten, sondern eben die Stromlinien zwischen Fundusdrüsen und Pankreasdrüsen-Ausgang, mit dem die Magenschleimhaut durch den Magendarm-Inhalt während des normalen Lebens elektrolytisch leitend verbunden ist. Leider sind solche Versuche meines Wissens bisher unterblieben.

Bohlen hat unter Biedermanns Leitung den Magenstrom während der Verdauung untersucht, aber ebenfalls die andere Elektrode von der Außenfläche des Magens angelegt. Biedermann beschreibt seine Versuche in seiner Elektrophysiologie (I. p. 426) wie folgt:

*) Nach Biedermanns Elektrophysiologie. I. Abt. p. 425.

Wenn die Verdauungstätigkeit eine elektromotorische Wirkung hervorbringt, so durfte man erwarten, eine wesentliche Änderung im nüchternen Zustande und während der Verdauung zu finden. Dies war nun allerdings der Fall, aber nicht in dem erwarteten Sinne einer Verstärkung des „Ruhestromes“ bei gefütterten Tieren, sondern im Gegenteil einer erheblichen Verminderung der Kraft. Nur in dem Falle, wenn unverdauliche, die Schleimhaut mechanisch reizende Stoffe, wie Steinchen, Holz usw., in den Magen gebracht wurden, ließ sich neben einer stark vermehrten Schleimabsonderung eine oft sehr beträchtliche Zunahme des normalen, einsteigenden Stromes nachweisen. In besonders auffallendem Grade zeigte sich dies nach Verabreichung von Bismuthum subnitricum, dessen scharfkantige Kriställchen als intensiver mechanischer Reiz zu wirken scheinen und in geradezu spezifischer Weise die Schleimbildung befördern. Ist das unlösliche Salz bis in die Kloake vorgedrungen, so bewirkt es auch hier starke Schleimabsonderung und dementsprechend Zunahme des einsteigenden Stromes, der dann wie beim Magen die Skala meist weit aus dem Gesichtsfelde treibt. Im übrigen zeigt sich die elektromotorische Kraft der Magenschleimhaut in ähnlicher Weise von verschiedenen Umständen abhängig, wie die der früher besprochenen, nur Schleim absondernden Objekte. Dies gilt hinsichtlich der Temperatur, der Wasserentziehung und Quellung, der Anaesthetica u. a. Direkte elektrische Reizung mit den rasch wechselnden Induktionsschlägen eines Schlittenapparates bewirkt erst bei geringem Rollenabstand eine negative Schwankung, der meist ein positiver Vorschlag vorausgeht. Die Stärke des ursprünglich vorhandenen Stromes ist dabei von wesentlicher Bedeutung, indem die der negativen Schwankung entsprechende Ablenkung sozusagen im direkten Verhältnis zur elektromotorischen Kraft des Präparates steht.

Auch bei Warmblütern, (Kaninchen, Meerschweinchen, Ratten) konnte Bohlen das Vorhandensein eines starken einsteigenden „Ruhestromes“ konstatieren. Nach Eröffnung der Bauchhöhle wurde durch ein Loch in der Magenwand eine unpolarisierbare, mit einem Tonpfropf verschlossene Röhrenelektrode eingeführt, während die andere der Außenfläche des Magens anlag. Da dieser bei Kaninchen und Meerschweinchen fast immer

reichlich mit Futtermassen gefüllt ist, so erfolgt die Ableitung von der Schleimhaut in diesem Falle unter Vermittlung des Inhaltes, so daß gewisse Einwände naheliegend erscheinen. Zunächst ist daran zu denken, ob nicht durch die Erwärmung der immer ziemlich tief in das Innere des Magens vorgeschobenen einen Elektrode Anlaß zur Entstehung von Thermoströmen gegeben wird, während andererseits durch den Mageninhalt selbst Spannungsdifferenzen verursacht werden könnten, die das Resultat der Beobachtung in unberechenbarer Weise zu trüben imstande wären.

Was zunächst die erste Frage angeht, so überzeugt man sich leicht, daß die durch den Temperaturunterschied eventuell entstehenden Ströme nicht in Betracht kommen gegenüber den oft gewaltigen Wirkungen des physiologischen Schleimhautstromes. Die zweite Frage erledigt sich durch die Beobachtung, daß fast unmittelbar nach dem Tode des Tieres ein Absinken der elektromotorischen Kraft eintritt, das bald zu einer Umkehr des Stromes führt, dann aber auch dadurch, daß der Strom in gleicher Weise und in derselben Intensität hervortritt, wenn man entweder den Magen ausräumt und ausspült und direkt von der Oberfläche der Schleimhaut ableitet, oder wenn der Magen an sich schon leer ist, was man bei Ratten leicht durch einige Hungertage erreicht.

Wie beim Frosch, schwankt auch beim Warmblüter die Intensität des Ruhestromes individuell innerhalb weiter Grenzen. Bisweilen, ja in der Regel ist derselbe so stark, daß die Skala weit aus dem Gesichtsfeld getrieben wird; in andern Fällen wieder beobachtet man nur Ablenkungen von wenigen Skalenteilen. Fast immer treten auch hier Oszillationen auf, deren Größe sehr wechselt.

In sehr auffallender Weise beeinflußt beim Säugetier eine tiefe Narkose die Stärke des Stromes der Magenschleimhaut. Mit einiger Vorsicht gelingt es bei Anwendung von Chloroform oder Äther, denselben so weit zu schwächen, daß die Ablenkung kaum 10 Skalenteile beträgt. Es ist dann immer eine längere Zeit erforderlich, um den Strom wieder auf seine frühere Höhe zu bringen.

Es wird dann weiter beschrieben, daß die künstliche Reizung des N. Vagus eine rasch vorübergehende positive Schwankung mit nachfolgender länger dauernder negativer Schwankung der Stromkraft herbeiführt, bisweilen bis zur vollständigen Umkehr des Stromes. Ferner hat Bohlen den Einfluß einer verstärkten Blutdurchströmung der Magenwand untersucht, aber keine Resultate erhalten, die ich zu Gunsten meiner Elektrolyse des Mageninhaltes ausdeuten möchte, da sie in einer Form angestellt wurden, die über Stromlinien quer durch die Magenwand etwas aussagen sollten, über Stromlinien, die ohne künstliche Ableitung durch Metalle sicherlich niemals existiert haben.

Die anderen Beobachtungen, der Rückgang während der Narkose, das Schwächerwerden während der Füllung des Magens und der Ableitung der Elektropositivität durch die breiten elektrolytischen Querschnitte des Mageninhaltes, die Bohlen unerwartet kam, spricht eher für die Elektrolyse des Magens, soweit man solche Versuche dafür in Anspruch nehmen kann, die eigentlich ein anderes Gebiet betreffen.

Interessanter waren die Versuche bei Warmblütern, bei denen durch Vermittlung des Mageninhalts abgeleitet wurde, der, obzwar rein chemisch ein saurer Mageninhalt eigentlich eine negative Ableitung gegen die alkalische oder neutrale Muskularis erwarten ließ, doch positiv reagierte, wie es die elektrolytische Hypothese der Magenausscheidung verlangt. Es stimmt sehr gut dazu und wird von keinem aufmerksamen Leser dieser Schrift anders erwartet werden, als daß nach dem Tode sich aus dem sauren Mageninhalt auf dem Wege der Flüssigkeitshaut des Magenloches eine schwache Säure-Alkali-Kette bildet, welche naturgemäß die entgegengesetzte Stromrichtung hat wie jener stärkere Primärstrom, der die Säure des Magensaftes erzeugt hat. (Nach dem mehrfach erwähnten Grundgesetz der Umkehr-Richtung aller Energie-Akkumulatoren oder -Kondensatoren.)

DIE THEORIE VON SLEESWYK.

Im Jahre 1902 erschien in Amsterdam (anscheinend im Selbstverlag) eine im Buchhandel nicht erhältliche und mir im Original leider nicht zugängliche Schrift von R. Sleeswyk „Der Kampf des tierischen Organismus mit der pflanzlichen

Zelle", von der ich Ende Juni 1917 auszugsweise im Anhang des III. Bandes von Hamburgers „Osmotischer Druck- und Ionenlehre" Kenntnis erhalten habe. Diese Arbeit wird von Hamburger als eine der interessantesten und gelehrtesten der letzten Jahre bezeichnet; wenngleich er einige offen daliegende Irrtümer hervorhebt, deutet er doch an, daß diese von der physiologischen Literatur unbemerkte Theorie einst wegen ihrer bedeutenden Gedanken ausgegraben werden wird. Ich habe den kurzen Auszug mit Spannung und mit Freude verschlungen, da dieser Holländer ganz unabhängig von mir und von ganz grundverschiedenen Objekten ausgehend zu einigen Fundamentalbegriffen gelangt, die ich teils früher, teils später ebenfalls ausgesprochen, wenngleich nicht so schlagend begründet habe wie er.

Es sei vorerst eine kurze Darstellung von Sleeswyks Ansichten nach Hamburger wiedergegeben:

Der Verfasser stellt sich auf den Standpunkt der Neuronenlehre, d. h. auch nach ihm besitzen die Ganglienzellen zwei Arten von Ausläufern: Dendriten und Neuriten, die mit der Ganglienzelle das Neuron bilden. Der Neurit (früher Deiters'scher Ausläufer genannt) ist, sofern es sich um ein motorisches Neuron handelt, der Nerv, der zum Muskel geht und sich darin zu feinen Fibrillen verzweigt.

Hier begegnet man bereits einer Abweichung von der gangbaren Meinung des kontinuierlichen Uebergangs des Nerven in den Muskel (d. i. die Zwischenscheiben), zwischen denen sich nach Sleeswyk noch ein wenig Lymphe befindet. Der den Muskel zur Kontraktion bringende Reiz muß nach dem Autor durch die Lymphe übertragen werden. Auch die Ganglienzelle mit ihren Ausläufern liegt in Lymphe. Es handelt sich also um eine galvanische Kette; die eine Elektrode ist die Ganglienzelle, mit den feinen Dendriten; die andere Elektrode wird von den feinen Fibrillen gebildet, die dem Muskel fest anliegen. Die Flüssigkeiten, in denen die Elektroden liegen, ist die beiderseitige Lymphe; den Verbindungsdraht bildet der Achsenzylinder.

Sobald chemische und damit osmotische Veränderungen an der Ganglienzellenseite stattfinden, entsteht ein elektrischer Strom, der den Muskel zur Kontraktion bringt. Die Leitung des Stromes zur Muskelsubstanz wird, wie bereits gesagt, durch die

Lymphe vermittelt; sie ist dazu imstande, weil sie eine Elektrolytlösung ist.

Ein starkes Argument für seine Anschauung erblickt Sleeswyk in der Wirkung von Curare. Was ist die Ursache der Muskellähmung durch Curare? Der periphere Nerv ist reizbar geblieben, der Muskel als solcher ebenso. Das Hindernis findet sich also im Nervenhügel. „Sleeswyk glaubt, daß die Wirkung des Pfeilgiftes darauf zurückzuführen ist, daß es die Leitfähigkeit der zwischen Nervenfibrillen und Muskel gelegenen Lymphe beeinträchtigt resp. aufhebt.“

An diesem Punkte muß ich die Darstellung von Sleeswyks Lehre schon unterbrechen. Der Verfasser, der schon 1902 die Bedeutung der Elektrizitätsübertragung durch Isolatoren (Dielektrika) für die Physiologie genau erkannt hat, die sich in der technischen Praxis als „Drahtlose Telegraphie“ oder besser Wellenstrahlen-Telegraphie bewährt und in der Theorie zu der fruchtbaren Elektronenlehre geführt hat, kommt in der Einleitung von dem für Nervenzellen so unzutreffenden Bilde der Voltazelle nicht los. Die scharfe Unterscheidung zwischen Galvanismus und Elektrostatik ist ihm in diesem Augenblick nicht gegenwärtig. Das System Muskel-Nerv, eine Röhre von Eiweißverbindungen zwischen Flächen mit leitenden Ionen erscheint ihm nicht als statischer Kondensator, sondern als galvanische Leitung, als Stromsystem. Obzwar längst experimentell erwiesen war, daß selbst eine Dauerkontraktion des Muskels nicht durch einen „Strom“ bewirkt wird, sondern durch intermittierende Elektrizitäts-Impulse (physiologisch: Tetanus), so übersieht er in Uebereinstimmung mit der alleinherrschenden galvanischen Richtung der Elektrophysiologie diesem Grundfehler zuliebe, die ihm sicher bekannte Tatsache, daß die normale lebende Nervenfaser, solange sie nicht verletzt ist, trotz der jahrzehntelangen Bemühungen der Elektrophysiologen keinen konstanten oder nicht konstanten überhaupt nur fließenden galvanischen Strom erkennen läßt.

Er übersieht ferner, daß sozusagen am Anfang jeder Lebenstätigkeit einer Zelle die isolierende Differenzierung des Gewebes steht, nicht die elektrisch leitende Differenzierung. Elektrolytisch leitend ist alles Unbelebte, in dem sich die Lebens-

tätigkeit der Zellen abspielt, Wasser, Erde, Meer, die Säfte der Pflanzen und Tiere, in denen die Bakterien und die Einzelzellen der höheren Organismen leben, elektrolytisch leitend ist vor allem das tote Gewebe, während die Isolierung geradezu das Kennzeichen des normalen, nicht gelähmten Lebens ist.

Wer jemals mit statischer Elektrizität gearbeitet hat und weiß, wie äußerst schwer und manchmal unmöglich diese Elektrizitätsart zu isolieren ist, der begreift wohl leicht, daß ein Pfeilgift wie Curare geradezu momentan Isolierungen aufheben kann, er wird es aber als unvorstellbar empfinden, daß eine elektrolytische Leitungsflüssigkeit wie Lymphe mit ihren Millionen verschiedenen Elektrizitäts-Vehikeln positiver und negativer Ionen, mit Kalium, Natrium, Kalzium, Chlor, Phosphorsäure, Kohlensäure etc. in wenigen Sekunden durch Curare in seiner Leitfähigkeit wesentlich beeinträchtigt werden kann. Nein, eine solche Störung des Ladungsgleichgewichtes kann nur dadurch schnell erzeugt werden, daß irgendwo die Isolierungen undicht, d. h. leitend gemacht werden. Bei den ultramikroskopisch dünnen Isolierschichten, um die es sich im lebenden Körper handeln kann, mag leicht das Gift ein Eindringen weniger Ionen erzeugen, die die Isolierung sofort stark stören und den für Muskelkontraktionen erforderlichen streng isoliert gerichteten Impuls stören.

Hamburger fährt nun in der Darstellung der Sleeswykschen Theorie fort, indem er die verschiedenen Strahlenarten aufzählt, angefangen von den langen elektrischen Hertz'schen Wellen über die ultraroten Wärmestrahlen, die Lichtstrahlen, die ultravioletten Strahlen bis zu den kürzesten elektromagnetischen Röntgenstrahlen. Ein elektrischer Strom besteht aus einer großen Zahl elektrischer Wellen von verschiedener Länge, resp. verschiedener Schwingungsgeschwindigkeit, ebenso wie das mit einem Bündel weißen Lichtes der Fall ist. Welches Gemisch von Elektrizitätsstrahlen in einem Strom vorhanden ist, das hängt von der Elektrizitätsquelle, eventuell von den chemischen Substanzen des Primär-Elements, ab. . . . Ob umgekehrt ein elektrischer Strom chemische Umsetzung herbeiführt, hängt von dem Umstande ab, ob darin Strahlen vorhanden sind, mit deren Schwingungen die betreffenden Teile der chemischen Verbindung resonieren können. Da der Strom eine große Mannigfaltigkeit enthält, so wird er wohl immer zu chemischen Umsetzungen

geeignet sein. So erklärt es Sleeswyk auch, daß ein einzelner Elektrizitätsstrahl, also ein Strahl von gewisser Wellenlänge im chemischen Sinne gewöhnlich unwirksam ist.

Bei dieser Anschauung läßt sich nach dem Autor auch der Leitungswiderstand verstehen. Diejenigen Elektrizitätsstrahlen, die den Schwingungen der Stoffe entsprechen, aus welchen der Schließungsdraht zusammengesetzt ist, bleiben im Draht zurück (und erzeugen Wärme). Was nicht mitschwingt, kann den Draht verlassen.

Was nun für einen Draht gilt, ist auch für einen Elektrolyten wahr. Die Leitfähigkeit wird hier bedingt durch die Frage, ob und wie weit die Ionen mit den Elektrizitätsstrahlen mitschwingen können. Die resonierenden Strahlen bleiben zurück, die nicht resonierenden verlassen die Elektrolytlösung. Je umfangreicher die Mitschwingung, um so größer ist das Leitvermögen. Auch das Leitvermögen der Elektrolyte ist keine einfache konstante Größe, sondern hängt auch mit von der Natur der Elektrizitätsquelle ab.

Und nun zur Anwendung auf die Curarewirkung! Diese beruht dann darauf, daß die Elektrizitätswellen, die durch den Nerv dem Muskel zugeführt werden, seitens des in der perimuskulären Lymphe angehäuften Pfeilgiftes zurückgehalten werden. Als ein vollkommen gleichartiger Vorgang wird die Toxinwirkung gedeutet. . . . Das Toxin hat das Vermögen eine Schirmwirkung auf Elektrizitätswellen auszuüben; d. h. bestimmten, von Neuronen kommenden Elektrizitätsstrahlen (Reizen) wird der Durchgang verweigert.

Sleeswyk unterscheidet die vom Neuron stammenden Reize nach ihrer Wirkung in assimilative und dissimilative. Die assimilativen Reize sind Elektrizitätsschwingungen, die Synthesen in der Zelle herbeiführen; die dissimilativen solche, die den Abbau besorgen. Bringt die chemische Zusammensetzung des Toxins es mit sich, daß dissimilative Reize durch dasselbe zurückgehalten werden, so kann Dissimilation in der Zelle nur in mangelhaftem Grade stattfinden und so bilden sich aus dem Protoplasma Produkte, die eine weniger weitgehende Spaltung erfahren haben, als sonst unter normalen Umständen stattfindet. Diese Protoplasmaprodukte von beschränktem Spaltungsgrad sind nach Sleeswyk die Antitoxine. . . .

Des weiteren wird die „erworbene Immunität“ u. a. besprochen. Ich kenne die verwickelte Literatur dieses Gegenstandes viel zu wenig, um ihn berühren zu dürfen. Ich kann nur finden, daß in dem kurzen Referat Hamburgers eine Fülle von neuen Gesichtspunkten eröffnet werden, die schon 1902, also vor 15 Jahren, einen Teil der Entwicklung vorweggenommen hat, die die experimentelle physikalische Forschung seither eingeschlagen hat. Mit einer bewunderswerten Folgerichtigkeit und manchmal ausgehend von Irrtümern hat Sleeswyk jene dunklen Punkte der Molekularphysik erhellt, bei denen auch die physiologische und biochemische Forschungsarbeit zu stocken pflegt.

Sleeswyk irrt wahrscheinlich, wenn er von Toxinen, die doch im allgemeinen sogenannte Nichtleiter der Elektrizität sind, eine Schirmwirkung auf Elektrizitätsstrahlen erwartet. Nur Leiter, und zwar in den bisherigen Experimenten nur metallische Leiter, die in Organismen ganz fehlen, haben Schirmwirkungen auf Elektrizitätsstrahlen gezeigt. Ganz im Gegensatz dazu ist zur unabgelenkten Fortpflanzung von Elektrizitätsstrahlen im allgemeinen ein Dielektrikum (Isolator) erforderlich. Experimente haben gezeigt, daß in einem gewissen Sinne die Undurchsichtigkeit für Lichtstrahlen bisweilen als Maß für die Abwesenheit einer metallischen Leitfähigkeit dienen kann, wie es die Theorie der Elektronen vorausgesagt hatte. Ueberhaupt haben die neuen Elektronen-Experimente unsere Tatsachenkenntnis sehr erweitert und uns einen ganz neuen Einblick in die metallische Leitfähigkeit gegeben. Abraham gebraucht in seinem Handbuch der Elektronen-Theorie den Vergleich, daß nicht der Metalldraht den Strom leitet, sondern daß er ihn nur wie eine Leitschiene führt, während die wirkliche Stromübertragung in dem Dielektrikum Luft längs des Drahtes stattfindet, und zwar in den Strahlwellen-Impulsen, die Sleeswyk schon 1902 intuitiv vorausgesagt hat.

Hamburger fühlt sich verpflichtet, die Ionentheorie in der alten Form, die sich so vielfach bewährt hat, gegenüber Sleeswyk in Schutz zu nehmen, dessen originelle Betrachtungsweise er im übrigen anerkennt. Es muß jedem, der die heutige physikalische Chemie überblickt, seltsam paradox erscheinen, daß ein Dilettant ohne Experimente eine ihrer Grundlehren angreifen will. Und doch ist es zweifellos richtig, daß alle

Leitungsfähigkeiten, Widerstände und Kapazitäten mit von der Elektrizitätsquelle abhängig sind, die die elektrische Energie liefert. Meines Wissens ist es noch keinem Chemiker eingefallen, die Ionengesetze nachzuprüfen für statische Elektrizitätsentladungen. Es werden sich dabei ganz sicher Anomalien der Elektrolyte ergeben. Man ist in der Elektrizitätspraxis zu sehr gewöhnt, die Elektrizität immer nur auf die sehr bequeme Art zu erzeugen, daß man einen Strom hervorbringt, der anderen gebräuchlichen Strömen sehr ähnlich ist.

Im Unterbewußtsein haben die meisten Physiker und Biologen (anscheinend ist übrigens auch Sleeswyk nicht ganz davon frei geworden) die Ueberzeugung, daß statische und strömende Elektrizität dasselbe ist. Diese aus einem historisch erklärbaren Wortbild entspringende Irrmeinung ist der Urgrund aller Mißerfolge der Elektrophysiologie und einiger Fehler der physikalischen Chemie. Natürlich ist statische und galvanische Elektrizität nach ihrem Ursprung dieselbe Energie, aber ihr Wesen, ihre Anwendung, ihre Gesetze, ihre Messung, kurz, ihre tatsächlichen Erscheinungsformen sind grundverschieden, wie wiederholt betont werden muß. Die Zufälligkeit, daß wir kein Sinnesorgan und kein besonderes Wort für statische und galvanische Elektrizität haben, ist für den Menschen nur sprachhistorisch von Interesse, objektiv wissenschaftlich aber ein besonderes Pech dieses Wissenszweiges, der gegenüber anderen zurückgeblieben ist.

Sleeswyk hat ganz richtig prophezeit, wenn er das Leitvermögen und den Widerstand von der Elektrizitätsquelle beeinflußt sieht; wer einmal versucht hat, mit galvanischen Elektrizitätsleitern statische Elektrizität zu leiten, hat sich davon experimentell überzeugen können, daß das Leitvermögen nicht eine Konstante in der Art ist, wie sie dem Elektro-Physiologen erscheint.

Meine besondere Freude hat natürlich hervorgerufen, daß Sleeswyk schon 1902 erkannt hat, daß der assimilative Potentialunterschied, dem dissimilativen entgegengerichtet sein muß. Schon der Physiologe Hering (der Ältere) hatte bei seiner Aufstellung des Assimilations- und Dissimilationsbegriffes an etwas Ähnliches gedacht, ist aber bei der Uebertragung dieses Gedankens auf die Elektrophysiologie in Vergessenheit geraten. Auch

ich kannte Herings Gedankengang, habe aber doch Jahre vergeblicher Versuche und Nachdenkens gebraucht, um die Wichtigkeit dieser Richtungsumkehrung für die Zelluntersuchung zu verstehen.

Sleeswyk hingegen hatte die fundamentale Bedeutung dieser Richtungsumkehrung in ihrem vollen Umfang erfaßt, er hat vielleicht nur hinzuzufügen unterlassen, daß diese Umkehrung eine Grundeigenschaft aller künstlichen und natürlichen Kraft-Akkumulatoren ist, also grundsätzlich allen lebenden Zellen zukommt, nicht bloß den Nerven. Ferner hat er anscheinend übersehen, daß die assimilatorische Aufladungsrichtung des Nerven nicht als Reiz bezeichnet werden sollte, sondern daß sie ohne Reiz stetig während der Ernährung und Atmung erfolgt, daß der Begriff Reiz also nur auf die dissimilatorische Richtung zutrifft, in welcher sich der Nerv auf irgendeinen Anstoß entlädt. Die beobachteten Tatsachen der negativen und positiven Schwankung des Nerven„stromes" sind offenbar physikalische oder chemische, polarisationserzeugte Neben- und Nachwirkungen der Reizentladung, die immer ihre arteigene Richtung behält.

Den Vorgang der Infektion und deren Bekämpfung führt Sleeswyk auf „osmotische Druckwellen" zurück; er stellt sich nämlich vor, daß ein Reiz, der eine tierische Zelle trifft, in derselben eine osmotische Störung veranlaßt. Diese beschränkt sich jedoch nicht auf diese Zelle selbst, sondern pflanzt sich durch „osmotische Druckwellen" auf die übrigen Zellen des Organismus fort. Die tierische Zelle ist also bei der Neutralisierung schädlicher Einflüsse nicht auf sich selbst angewiesen, der ganze Körper beteiligt sich an der Reaktion. Was die osmotischen Druckwellen selbst betrifft, so sind das nichts anderes als elektromagnetische Schwingungen. Reiz und Reizwirkung sind demnach energetischer Natur.

Soweit Sleeswyk. Wenn ich hinzufüge, daß ich überzeugt bin, die Agglutination von Bakterien ist ein Vorgang, bei dem die Bakterien vorher ihre arteigene elektrostatische Lebens-Ladung eingebüßt haben dürften und das Antitoxin-Molekül könne kaum anders wirken als durch elektromagnetische Synchron-Schwingungen, wie ich es in den „Elektrostatischen Zellkräften" angedeutet habe, so wird dies dem Fachspezialisten

nur ein Lächeln entlocken. Ich bekenne gern, daß meine vollständige Unkenntnis des Detailproblems mich nicht dazu berechtigt, neue Hypothesen über Immunität und Antitoxine aufstellen zu wollen, ich meine nur, daß die Art, wie wieder die Fachspezialisten das Problem behandeln, selbst so virtuose Chemiker wie Ehrlich und seine Schüler, mir unrichtig und in einem gewissen Sinne beinahe unmethodisch erscheint. Man kann noch so grandios als organischer Chemiker sein, so darf man doch nicht ein ganzes Gebiet der mit dem Zellchemismus sicher verknüpften Elektrochemie und Elektrostatik einfach ignorieren. Man darf doch nicht Giftstoffe und Antikörper in ihrer Komponenten zerlegen, ohne ein einziges Mal den Versuch zu machen, ob diese Teilkörper nicht vielleicht nur Neutralstoffe sind, die eine arteigene elektrische Kolloidladung oder ein anderes elektrisches und nicht chemisches Hauptmerkmal besitzen.

Das Grundprinzip der deutschen wissenschaftlichen Naturforschung und ihrer Presse, alle rein geistigen Diskussionen (namentlich solche von nicht graduierten, keinem Institut angehörenden freien Schriftstellern) beiseite zu schieben, in keine allgemein verbreitete wissenschaftliche Zeitschrift aufzunehmen, ist wahrscheinlich richtig. Die großen Erfolge dieses Grundsatzes liegen vor aller Augen. Aber hie und da sollte es doch möglich sein, eine Ausnahme von dieser Regel zu machen, beispielsweise im Falle Sleeswyk und, wie ich hoffe, auch in meinem eigenem.

Eine eiserne Gewohnheit, die den Zwangscharakter eines priesterlichen Rituals angenommen hat, verlangt ferner, daß jede neue Anschauung, die Veröffentlichung beansprucht, sich vorher experimentelle Belege verschafft. Dieser Grundsatz, so aufliegend seine Vorteile sind, hat auch seine schweren Schattenseiten. Nicht jeder Mensch, dessen Hirn spezialisiert ist für das Erfassen neuer Ausblicke, für Zusammenhänge getrennt arbeitender Wissenschaften, hat die Zeit, die Mittel oder das technische Geschick und die spezialistische Erziehung, um erfolgreich Experimente unternehmen zu können. Da geschieht es nun, daß ein Haufen von Universitäts-Karriere-Beflissenen von demselben heiligen Ritual, das die leidenschaftlichen Denker von dem Gehörtwerden ausschließt, gezwungen werden, hundertmal durchgeführte Experimente mit belanglosen Variationen zum hundert-

einten Mal zu wiederholen, obzwar innerer Beruf und Begabung sie zu sehr guten Lehrern befähigen würden und die Lehrtätigkeit und Prüfungstätigkeit nur in einem ganz äußerlichen Zwangsverhältnis mit der Naturforschung steht.

Unter sonst gleichen Umständen ist eine neue Hypothese, die sich auf ältere Experimente fremder Forscher stützen kann, naturgemäß viel verläßlicher als eine solche, die sich nur eigener Experimente bedienen kann und die Strenge, die alle bloß theoretischen Neuerer vom Tempel des Gelesenwerdens ausschließt, geht entschieden zu weit. Wer sich lange auf dieser Schattenseite der deutschen Wissenschaft aufhalten mußte, kann nicht anders als mit sehr bitteren Empfindungen die sich füllenden Bände der Revuen und Archive durchmustern, in denen eine Menge von Unnützem, Unsachgemäßem und unnötig Breitem die Wenigen erdrückt, die wirklich Neues und Wesentliches zu sagen haben.

SEKRETIONSTHEORIEN.

In der biochemischen Literatur wird seit Jahrzehnten ein heftiger und ausdauernder Kampf geführt, zwischen den Anhängern der sogenannten „Sekretionstheorie" und zwischen der sogenannten „physikalischen" Anschauung. Die Kampfgebiete sind Magenverdauung, Darmresorption, Nierentätigkeit und Lymphbildung. Die Sekretionstheoretiker finden, daß man diese Lebensvorgänge mit Filtrationsdruck, Osmose, Mitführungskraft, Imbibition und Schrumpfung nicht ausreichend erklären kann und behaupten, daß die spezifische Lebenstätigkeit der Zelle etwas schafft, was die bloße Physik bis jetzt nicht erklären können; sie werden deshalb auch Neuvitalisten genannt. Die physikalische Richtung findet, daß sie alle diese Vorgänge erklären kann. Merkwürdigerweise finden sich Forscher, die z. B. bei der Lymphbildung die Neovitalisten verteidigen, bei der Frage der anderen Organtätigkeit auf Seite der sogenannten „physikalischen" Partei.

Nach und nach haben die Neovitalisten so viel überzeugendes experimentelles Material herbeigeschafft, daß die Anhänger der rein „physikalischen" Richtung immer mehr in den Hintergrund gedrängt worden sind; sie haben sich mit der Hoffnung begnügt, daß in naher Zukunft neue Entdeckungen der Physiker

oder der Biologen auch die letzten bisher noch unerklärten Zellkräfte auf physikalische Kräfte zurückführen werden. Naturgemäß leugnen auch die Neovitalisten nicht, daß ihre bisher nicht erklärten „vitalen“ Kräfte der Zelle physikalischer Natur sind, sie finden nur, daß die von der Gegenseite herangezogenen Kräfte nicht genügen.

Für den Leser dieser Arbeit wird kein Zweifel darüber bestehen, in welcher Weise die vorliegende Schrift zu dem Streitproblem Stellung nimmt. Ich finde natürlich, daß beide Teile recht und beide unrecht haben; beide Teile übersehen, daß es neben Osmose, Quellung, Schrumpfung, Filtrationsdruck noch physikalische Kräfte gibt, die sie bisher nicht in Betracht gezogen haben und die einen großen Teil des unerklärlich Gebliebenen aufklären müssen.

Man wird längst erraten haben, daß man meiner Meinung nach die elektrische Ladung der Zellen übersehen oder unterschätzt hat. Gesehen von dem Standpunkte des Elektrostatikers, der in der differenten Ladung der Zellteile das lebendigste Merkmal ihres Daseins erblickt, sind die scheinbaren Widersprüche der beiden großen Lehrmeinungen keine Widersprüche mehr, sie folgen vielmehr zwangläufig aus dieser Grundansicht. Es ist nicht mehr sonderbar, wenn die lebende Darmwand gegen die Richtung des osmotischen Druckes Salze aus weniger salzhaltigen Lösungen aufnimmt und wenn die Niere umgekehrt hochkonzentrierte Lösungen aus verdünnten abgibt. Die Idee des Elektrizitätgefälles der lebenden Zelle fordert geradezu, daß der durch lebende Zellen in einer bestimmten Richtung ihrer Konfiguration hindurchgetriebene Flüssigkeit sich energetisch verändert und es wäre für den Gedanken der elektrostatischen Zellkräfte ein direkter Gegenbeweis, wenn die Darmwand als bloßes osmotisches Filter fungieren würde.

Auch die Tatsache, daß z. B. die Darmwand ihre Kraft, Lösungen verändert zu filtrieren, eine Zeitlang nach dem Tode beibehält, ist nicht verwunderlich, weil die elektrischen Zellkräfte wohl zum Teil nach dem Absterben der Zelle ihre Richtung behalten, zum Teile auch umkehren, aber noch lange nicht ganz verschwinden. Verwunderlich bleibt bei diesem Experiment höchstens, daß ziemlich lange nach dem Tode der Warmblüter noch antiosmotische Energien der gleichen Richtung konstatiert wer-

den. Elektrisch sieht das so aus, als ob der Darm eigene Kraftreserven (hintereinander geschaltet mit dem Zentralapparat) besäße, die erst einige Zeit nach dem Tode sich verbrauchen. Tatsächlich besitzt der Darm eigene Ganglien und die Zweckmäßigkeit vom elektrischen Standpunkt läge dann darin, daß eine Umkehrung der Stromrichtung, die bei allen elektrochemischen Sekundärzellen beim Schwächerwerden des ladenden Zentralstroms leicht passiert, unbedingt verhindert werden muß. Eine Umkehrung des Darmpotentials müßte vergiftend wirken.

Der Verdauungskanal hätte also seine Akkumulatoren-Anlage in der Form der Nervenganglien in sich für den Fall einer Störung des Blutkreislaufes, der, wie ich glaube, im normalen Leben die elektrischen Kräfte zu liefern hat und der gleichsinnig von den Ganglien des Verdauungskanals unterstützt wird, die sich in gewissen Stadien der Verdauung und Resorption gegensinnig aufladen, um im Hungerzustand notfalls die Ladungen bereitzuhalten, die für die normale Resorption benötigt werden.

Niemand kann auf Grund der heute vorliegenden sicheren Tatsachen und auf Grund des heutigen Standes der Physik sich eine einwandfreie Vorstellung von dem machen, was Reizleitung genannt wird. Wir wissen nur sicher aus den Messungen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, daß die Reizleitung sicher keine einfache elektrische Leitung ist. Aber wir wissen bereits, daß bei allen nervös eingeleiteten Zellvorgängen elektrische Impulse einer bestimmten Richtung in den Nervenbahnen nachzuweisen sind, die gewöhnlich Aktionsstrom genannt werden, richtiger aber Aktions*welle* genannt werden sollten. Gleichgültig wie es sich mit dieser sicher konstatierten Elektrizitätsbewegung verhält und gleichgültig, wie sie sich fortpflanzt, das eine ist wieder sicher: diese bei längeren Reizungen nicht als konstanter Strom sondern als tetanische intermittierende Impulse festgestellten Elektrizitäts-Verschiebungen müssen, da die Nerven sowohl wie die Muskeln direkt oder indirekt von Lymphe umgeben sind, in dieser elektrolytischen Flüssigkeit (sicher auch im Blut, was aber hier nicht in Betracht kommt) Konzentrationsunterschiede erzeugen, die mittelbar eine Wasserbewegung erzeugen müssen, sofern die Elektrizitätsbewegung nicht von sich allein aus schon elektroosmotisch das Wasser verschiebt, was

sehr wahrscheinlich ist. Ebenso muß die Muskelarbeit, ob sie nun elektrisch geschieht oder nicht, zumindest indirekt Konzentrationsgefälle erzeugen, sehr wahrscheinlich nach der Richtung einer Wasseraufnahme aus der Umgebung, wie wir sie bei allen vorwiegend kathodischen Flächen, im Darm, in den gewundenen Kanälchen der Niere entweder direkt beobachten oder sehr stark vermuten.

Es ist nicht meine Sache, ein Urteil darüber abzugeben, ob nicht die sogenannte „physikalische" Richtung darin recht hat, daß sie die Lymphbildung auf Blutdruck, Filtration, Kapillardruck oder dergl. zurückführt. Man wird mir aber darin beistimmen, daß neben diesen zahlreichen Kräften auch die elektrischen Potentiale der lebenden Gewebe ihren Teil dazu beitragen, daß unter gewissen Umständen Konzentrations-Unterschiede entstehen.

Der Versuch von Hamburger, bestätigt von Moussu, über die Lymphbildung beim arbeitenden Pferd, bei dem die anderen physikalischen Erklärungen sämtlich versagt haben, ist von der elektrochemischen Anschauung direkt gefordert und dürfte nicht anders ausfallen. Hamburger zeigte nämlich, daß ein arbeitendes Pferd viel mehr Lymphe abgibt als ein ruhendes, obgleich bei der Arbeit der Rumpf- und Beinmuskeln der Blutdruck in den Kopfkapillaren nicht ansteigt. Ich bin dessen ganz sicher, daß ein Mensch, der heftig nachdenkt, in diesem Augenblick mehr Kopflymphe erzeugt als Nebenprodukt des Ablaufes der Elektrizitäts-Verschiebungen im Hirn.

Wie immer man sich diese primären oder sekundären Elektrizitäts-Impulse in den Nervenfasern denkt, immer wird an seinen Verbindungsbrücken gegen die Lymphe etwas entstehen, was Sleeswyk mit dem Ausdruck „osmotische Druckwellen" bezeichnet hat und untrennbar mit der Elektrizitätsbewegung in Elektrolyten verknüpft ist.

DIE KONZENTRATIONSARBEIT DER NIERE.

Schon früher ist in den Grundzügen angedeutet worden, wie ich mir die der rein chemischen Betrachtung so rätselvolle Konzentrationsarbeit der Niere vorstelle. Auch in den „Elektrostatischen Zellkräften" ist schon hervorgehoben worden, wie ich

mir die Elektrolyse des Glomerulus Filtrates in den Harnkanälchen gedacht habe, gegen die Lichtung der Harnkanälchen mit dem Glomerulus als positivem Pol (Anode) und dem Epithel der gewundenen Kanälchen als negativem Pol (Kathode). Die Energie für die Umsetzung liefert anscheinend der Kreislauf, d. h. die Oxydation von elektropositiven Nahrungsstoff-Atomgruppen durch die elektronegativen des durch den Kreislauf herangebrachten Oxyhämoglobins. Es versteht sich von selbst, daß Störungen oder Hemmung des Kreislaufes die elektrolytische Konzentrationsarbeit behindern und statt des hypertonischen (konzentrierteren) einen hypotonischen (verdünnteren) Harn liefern müssen, wie man es tatsächlich beobachten kann.

Auf die Niere habe ich sehr bald große Hoffnungen gesetzt, daß sie die experimentelle Auswertung meiner Idee am ehesten erlauben wird, weil sie eines der wenigen Organe ist, die während des normalen Lebens einen gleichsinnigen, chemischen Richtungsantrieb erkennen läßt, nicht einen Wechsel von periodischen Assimilationen und Dissimilationen wie die meisten übrigen Zellarten, die die Deutung der Färbungsexperimente sehr erschweren. Bei den meisten Organen, bei denen Lebendfärbungen mit Gefrierfärbungen und fixiertem toten Gewebe sich vergleichen lassen, kann man schwer erkennen, ob der Farbstoff sich in der assimilatorischen oder in der dissimilatorischen Phase ihres Lebens niedergeschlagen hat, ob die Zelle schon durch die Färbung abnormal funktionierte oder gar degeneriert oder tot oder physiologisch ausgeschaltet war.

Schon zu Beginn meiner Studien, als ich noch sehr wenig von der Anatomie und Histologie der Niere wußte, hatte ich mir aus verschiedenen physikalischen Gesetzen zurechtgelegt, daß im allgemeinen, soferne nicht Säfte des Körpers eine besondere paradoxe Ladung tragen, aus elektro-endosmotischen Ursachen die anodischen Drüsen Wasserausscheidungstendenzen zeigen müßten, die kathodischen Wasserresorptionstendenzen. Bei den Drüsen, die direkt im Verdauungskanal gelegen sind, bei Fundusdrüsen und Darmdrüsen stimmt dies wunderbar, die positiven geben anscheinend Säfte ins Lumen ab, die negativen saugen Wasser aus dem Darminhalt ab. Bei der Leber und dem Pankreas, die durch den Gallen-Pankreasgang mit dem Verdauungskanal in Verbindung stehen, scheint es anders zu sein, da trotz-

dem gewisse Wassermengen mit ins Lumen der Drüse gehen, was besonders beim Pankreas sehr merkwürdig ist, das anders als die Leber dem Verdauungskanal gegenüber zweifellos rein kathodisch polarisiert ist. Das Pankreas arbeitet jedoch periodisch und erzeugt seine kleinen Wassermengen möglicherweise indirekt, indem seine hochkonzentrierten Elektrodenflüssigkeiten nachträglich, sei es von der Lumenseite, sei es aus dem Blute, sei es von beiden Seiten oder aus der Lymphe Wasser anziehen.

Nach der allgemeinen Regel ist in der Niere im Glomerulus, dieser vorerst als Filterapparat betrachtet, eine positive Ladung gegen die Harnseite zu erwarten und in den gewundenen Kanälchen, wenn sie wirklich Wasser resorbieren, wie überwiegend angenommen wird, die Kathode gegen die Harnseite. Ist dieser Gedanke richtig, so mußte erwartet werden, daß der Glomerulus ein Sauerstoffort ist, daß er das arterielle Blut an Sauerstoff eher anreichert, als daß er Sauerstoff verbraucht, es wäre sehr merkwürdig gewesen, wenn nunmehr das Blut aus dem Glomerulus direkt in die Venen übergegangen wäre. Ich vertiefte mich nun in den Arbeiten über Histologie der Niere in die genauere Beschreibung des Blutkreislaufes in der Niere und fand meine Vermutung bestätigt. Die Nierenkapillaren erhalten ihr Blut zum großen Teil nicht aus den Arterien direkt, sondern aus den Glomeruli der Rinde, die also das Blut noch nicht des Sauerstoffes berauben.

Natürlich hat diese, für mich nach meiner Vermutung eingetroffene Bestätigung durch ältere Experimente, die zu ganz anderen Zwecken unternommen gewesen waren, mich sehr ermutigt. Ich begann mich für die Vitalfärbungen der Niere zu interessieren und studierte alles Material, das mir darüber zugänglich war. In den vielen hundert Seiten der Beschreibungen neuer Experimente, die namentlich in den letzten Jahren sich mit diesem Gegenstand beschäftigten, findet sich immer wieder die Beobachtung, daß die ins Blut gebrachten Lebendfarbstoffe, soweit sie nicht in den Nierenkanälchen direkt reduziert und farblos gemacht wurden, was eigentlich der sicherste Beweis ihrer stark kathodischen Polarität ist, daß also bei allen nicht reduzierbaren Vitalfarben das Epithel der Tubuli contorti einer der ersten Orte des Körpers ist, in dem der Farbstoff ausfällt, demnach innerhalb des direkten Kreislaufes die am stärksten reagierende

Kathodenfläche — von der Blutseite. (Es ist klar, daß ein Punkt, der gegenüber Blut negativ polarisiert, nicht auch gegen Harn oder Lymphe kathodisch polarisiert sein müßte.)

Die zahllosen Experimente, die andere Nichtelektrochemiker für mich angestellt haben, um Beweise für die starke Polarität der Nierenkathoden zu schaffen, ohne diese zu suchen oder von dieser Annahme überhaupt gehört zu haben, machten meine Vermutung für mich zur Gewißheit.

Nun läßt sich aber gegen meine Deutung der Experimente vielleicht manches einwenden. Aber immer mehr und mehr häuften sich die Experimente von Unbeteiligten, die immer direkter und direkter auf die Unaufschiebbarkeit der elektrochemischen Fundierung der Färbungsmethoden hinzeigten. So hatte ich z. B. in den „Elektrostat. Zellkräften" darauf hingewiesen, daß die Glomeruli der Niere, wie schon erwähnt, Sauerstofforte sein müßten, d. h. daß paradoxerweise hier mitten in reduzierenden Geweben im Kohlesäurerest (Kohlensäure-Anion) freier Sauerstoff erscheinen müsse.

Zwei Jahre später erfand Unna in Hamburg eine Methode, die Sauerstofforte in Gefrierschnitten färberisch nachzuweisen, indem er Leuko-Methylenblau zu blauem Methylenblau oxydieren ließ. Unna hat sich wie alle Histologen und Dermatologen niemals um Elektrochemie bekümmert, das Wort kommt in seinen Schriften nicht vor und meine Arbeiten waren ihm ganz unbekannt geblieben. Mit Spannung schlug ich seine Untersuchung auf und mit Freude fand ich, daß einer der stärksten Sauerstofforte, der ihm bei seinen Untersuchungen aufgefallen war, der Glomerulus der Niere gewesen ist.

Die Sauerstoffproduktion des Glomerulus hat er durch einen Gegenbeweis nochmals sichergestellt, indem er ihn bei seiner Methode der Reduktionsorte konträr ausfärbte. Bei der Reduktionsmethode färbten sich dagegen die Epithelien der Tubuli contorti stark, gerade jene, die ich als Reduktionsorte (Kathoden) vorausgesagt hatte.

Auch vieles andere, was in den „Elektrostat. Zellkräften" vorausgesagt war, z. B. die Anodennatur der Knäueldrüsen der Haut, bestätigte sich in gleicher Weise durch Unnas Methode der Oxydations- und Reduktionsorte, die, richtig ausgedrückt,

eine Methode der Untersuchung auf Anoden und Kathoden genannt werden müßte.

Diese vielen Uebereinstimmungen zwischen Experiment und Voraussagung auch bei so paradoxen Behauptungen wie bei der Sauerstoffproduktion tierischer Gewebe, die man bisher als ein Monopol der Pflanzenzelle betrachtet hat, gaben mir die feste Gewißheit, daß die Methode der elektrochemischen Betrachtung eine richtige Methode ist, die dazu bestimmt sein dürfte, einige der unerklärlichsten Probleme der Biochemie aufzuhellen und daß alles daran gesetzt werden müsse, um die histochemische Experimentalforschung mit dem Geiste dieser Denkweise vertraut zu machen.

Es ist nicht unmöglich, daß die elektrische Potentialdifferenz Glomerulus — Kanälchenlumen durch die Druckwirkung des Blutes elektro-endosmotisch, also durch die dielektrische Differenz zwischen Blutplasma und Glomerulus-Diaphragma ausgelöst wird; es ließe sich so verstehen, daß automatisch eine Regulierung der Leitfähigkeit des Blutes eintritt, welche immer konstant gefunden wird, denn diese Differenz wird größer, wenn die Leitfähigkeit des Blutes zurückgeht und kleiner, wenn die Leitfähigkeit des Blutes steigt. Bei größerer Spannung wird die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen beschleunigt, die Oxydationswirkung der elektrischen Potentialdifferenz verstärkt, der Widerstand, den das Diaphragma der Wasserbewegung entgegensetzt, verändert, kurz es tritt eine Vielheit der Wirkungen in den Nieren-Diaphragmen, in den Schweißdrüsen-Diaphragmen, und in allen analog unter Blutdruck stehenden Membranen ein, so daß eine Regulationswirkung zu begreifen wäre.

Dieser Mechanismus würde allerdings nur einen einzigen Faktor der Regulierung erklären, nämlich die Konstanz der Leitfähigkeit, nicht aber die viel schwerer begreifbare Tatsache, daß nicht nur die Leitfähigkeit, sondern auch der Anteil der einzelnen Ionenarten an ihr bei den höheren Tieren konstant bleibt.

MIKROCHEMIE ODER MIKROELEKTROCHEMIE?

Man könnte einwenden, daß es im Grunde gleichgültig sein könnte, ob in erster Reihe elektrische Potentiale oder ob rein chemische Reaktionen die Hauptursachen der verschiedenen Zell-

färbungen sind. Jeder weiß heute, daß chemische Reaktionen in Lösungen unter allen Umständen Ionenreaktionen, also elektrochemische Reaktionen sind, daß auch die Umladung der Kolloide durch Säuren und Basen ein elektrischer Vorgang ist und daß schließlich auch die Adsorptionserscheinungen vielfach mit elektrostatischen ultramikroskopischen Anziehungskräften zusammenhängen. Also ist es schließlich kaum mehr als ein neues Wort für einen alten Vorgang, dessen subtilster Mechanismus für den Biologen kein grundlegendes Interesse zu haben scheint.

Das ist aber doch keineswegs so. Für die Beurteilung der chemischen Natur der Zellbausteine kommt nämlich gerade der entgegengesetzte Charakter in Frage, wenn man die Tinktionen als elektrisch verursacht betrachtet, als wenn man an sie mit dem Vorurteil herantritt, die Zelle sei ein lebloses chemisches Laboratorium, in dem die Reagentien sich genau so verhalten wie in einem Probierglas. Der Unterschied ist etwa folgender: der einseitige Chemiker färbt beispielsweise, um Basen und Säuren des Kernes herauszufärben, mit einer Mischung einer basischen mit einer sauren Farbe. Ein Zellbaustein, der saure Farbmittel aus der Mischung an sich zieht, erscheint ihm basisch, der andere, der die basische Farbe wählt, wird von ihm als sauer betrachtet. Derjenige aber, der die in der Zelle zweifellos vorhandenen starken Elektrizitätspotentiale als bewegende Hauptursache zumindest der reinen Vitalfärbung ansieht, nimmt die Möglichkeit an, daß die Teerfarbe genau so elektrolysiert werden könnte wie die normalen Zellnährsalze und Nährstoffe. Wo also Säurefuchsin ausfällt, wird er im Gegensatz zum Nichts-als-Chemiker eine vorwiegend saure Verbindung vermuten, wo das basische Zyanin ausfällt, vermutet der Elektrochemiker zunächst eine überwiegend basische Albuminverbindung.

Durch diese Ueberlegung wird also die Fundamentalmethode der gegenwärtigen Mikrochemie berührt und alle anderen zum Teil sehr geistreichen Spekulationen, die daran geknüpft sind. Namentlich die Mikro-Chemie der Kernstoffe, der Nukleoproteide, ist ganz auf derartige Ueberlegungen aufgebaut. Im unbelebten Laboratoriumsversuch färbt sich Nukleohiston grünblau, mit Vorherrschung des blauen Tons, Nuklein blaugrün, Nukleinsäure intensiv grün. Diese Farbenreaktionen glaubte man einfach teils auf die lebende Zelle übertragen zu

können, teils auf die fixierte, tote Zelle, deren Kolloide soeben durch Säurefixation elektrisch umgeladen und deren Elektrochemismus möglicherweise in der entgegengesetzten Richtung der Lebensaufladung sich entlädt oder entladen hat. Wer sich die Mühe gibt, diesen Gedanken zu Ende zu denken, wird darauf kommen, daß die alte Methode wahrscheinlich in der Mehrzahl der Fälle die Säuren dort vermutet, wo gerade die Basen sind und umgekehrt.

Aus diesem Grunde ist es unerläßlich, daß man die lebenden Zellen mit halbnormalen Stoffen, d. h. mit solchen, die sie an Stelle der normalen verwenden können und die sich nach raschem Gefrierenlassen mikrochemisch leicht auffinden lassen, geprüft werden, wohin sie die ihnen regelmäßig zukommenden neutralen Stoffe verteilen, wohin die saure Komponente geht (das Anion) und wohin die basische (das Kation). Es ist keinen Augenblick daran zu zweifeln, daß die normale lebende Zelle die Säurenpunkte dort haben wird, wo die Nur-Chemiker die Basenpunkte annehmen und umgekehrt, wenn man chlorhungrigen Zellen Brom oder Jod darbieten wird, oder natriumhungrige Zellen mit Lithiumsalzen füttern wird.

Es konnte nicht anders geschehen, als daß dieser Grundfehler der Ausgangspunkt geworden ist für eine große Zahl der verdrehtesten Hypothesen und Theorien, da sich die Folgerungen des Grundirrtums absolut nicht mit den Tatsachen zusammenreimen ließen. Wer die Literatur der Biochemie des Zellkerns, der Nukleolen, des Basichromatins, des Oxychromatins daraufhin durchsieht, begegnet auf Schritt und Tritt bei den vorsichtigsten und kenntnisreichsten Chemikern gequälten Annahmen, durch die unvereinbare Tatsachen mit der Idee verknüpft werden sollten, daß auch in der lebenden Zelle die Basen die Säuren anziehen, oder die hochoxydierten Verbindungen die Reduktionsmittel, oder die reduzierenden Stoffe die Oxydationsmittel. Wer diesen Dingen näher kommen will, muß sich vorerst von dem Anthropomorphismus des Reagensglases freimachen, wenn er einen lebenden Organismus untersucht!

Im Zusammenhang damit, daß Säure an den Basenpunkten und Basen an den Säureorten angenommen werden, bestand auch die schon erwähnte Nötigung als reduzierende Punkte jene anzusehen, die gierig Sauerstoff- und Oxydationsmittel an sich ziehen

und als Oxydationsorte jene Punkte, die eine Affinität zu oxydierenden Reagentien erkennen lassen. Dabei ergaben sich einige Schwierigkeiten, die mit der Laboratoriumschemie nicht zusammenpaßten, so zum Beispiel ließ es sich absolut nicht übersehen, daß Körper, die jeder Chemiker nicht anders ansehen konnte wie als typische Reduktionsstoffe, z. B. die Substanzen der meisten Zellkerne, die Mastzellen, gewisse Nierenzellen offensichtlich physiologisch starke Oxydationskräfte erkennen ließen, was so ganz und gar nicht stimmte erstens mit ihrer inneren chemischen Natur, zweitens mit dem Gedanken, daß diese chemische Natur die Hauptursache der biochemischen Prozesse sei. In solchen Fällen hilft sich der ältere Biochemiker einfach damit, daß plötzlich ein Ferment auftritt, eine sogenannte Oxydase, oder, wo diese nicht genügt, sogar eine Peroxydase, Stoffe, die noch nie jemand gesehen oder gar isoliert hat und die die wunderbarsten Leistungen vollbringen; wenn einmal das Zauberwort Ferment hervorgeholt ist, so sind alle weiteren Nachprüfungen unmöglich und unnötig. Einem Ferment glaubt man einfach alles!

Obzwar die organischen Mikrochemiker ein riesiges Material über Oxydasen zusammengetragen haben, sind die Resultate doch keineswegs beweiskräftig, Ueber die wirklich chemische Natur des Protoplasmus, der Granula, der Fadenstrukturen, des Kernes, der beiden Kernchromatine, des Kernkörperchens wissen wir heute kaum mehr als vor etwa zwanzig Jahren. Es fehlt an einem System der Mikrochemie, wie es die anorganischen Analytiker und Mineralogen längst besitzen.

Unter den Mikrochemikern interessierte mich am meisten P. G. Unna durch die Originalität seiner experimentellen Methoden und durch den Umstand, daß er an drei Stellen (Glomerulus, Tubulus und Knäueldrüse der Haut) mit seinem neuen Verfahren ohne Kenntnis meiner Bestrebungen genau das fand, was ich in meiner letzten Schrift 1912 in diesen Zellen prophezeit hatte. Seine Schriften, die dem chemischen Problem der Zelle mit überraschenden geistvollen Versuchsanordnungen zu Leibe gehen, sind für den elektrochemisch interessierten Leser eine wahre Fundgrube von sehr erwünschten experimentellen Belegen.

Unter anderem hatte ich die im Pflanzenteil geschilderten Versuche in Angriff genommen, um durch die bloße Änderung des Zeitfaktors lebende Gewebe invers zu färben und dadurch

zu erweisen, daß nicht der Chemismus der Zellteile, sondern ihr momentaner elektrischer Zustand die Färbungsreaktionen hervorbringt. So z. B. wollte ich ein Gewebe erst in Eisenchlorid legen, dann auswaschen, dann in Ferrozyankalium, um auf den kathodischen Punkten Fällungen von Berlinerblau zu erzielen. Dann Schnitte von demselben Gewebe zuerst in Ferrocyankalium, dann in Eisenchlorid legen. Es begreift sich leicht, daß dieser Versuch ein experimentum crucis werden sollte, falls die elektropolaren Punkte nicht zu nahe jenseits der Sichtbarkeitsgrenze der Mikroskope beisammen lagen und der richtige Zeitpunkt getroffen wurde, in dem die vitale Elektropolarität des Gewebes gerade erlischt, aber noch Zeit genug findet, um die Reagensflüssigkeit zu elektrolysieren. Versuche an naturhart schneidbaren Knorpeln und Hornhautgeweben fielen anfangs, bevor ich die Versuchstechnik beherrschte, nicht befriedigend aus, an Pflanzenstengeln zeigte sich wohl gleich eine sehr deutliche Verschiedenheit der Färbungen, aber keine direkte Kontrastfärbung, wie ich sie gewünscht hatte.

Zufällig entdeckte ich in Unnas „Biochemie der Haut",*) daß Unna auch einen Versuch dieser Art schon gemacht hat. Er beschreibt ihn in folgender Weise: „. . . Die Eisen-Tannin-Methode gehört zu den „Reaktionsfärbungen", indem sie auf der starken Affinität der Hornsubstanz zu Eisenchlorid beruht und die Verbindung Horn + Eisenchlorid sodann unter Auftreten eigentümlicher Färbungen mit Tannin reagiert. Das Eisenchlorid verbindet sich als stark oxydierendes Salz durch oxypolare Affinität ganz mit der stark reduzierenden Hornschicht, ohne von dieser zu Ferrosalz reduziert zu werden; da diese Verbindung mit Phosphorwolframsäure nicht wie Ferrosalze grün wird und ein Ferro-Keratin auch nicht mit Tannin weiter reagiert, werden auch nur Ferri-, nicht Ferrosalze von der Hornschicht aufgenommen, da mit Ferrosulfat getränkte Hornschicht nach dem Auswaschen von Schwefelammonium nicht geschwärzt wird. Die Hornschicht verhält sich also zu Eisensalzen streng oxypolar und hat als reduzierende Substanz nur zu Oxyden, nicht zu Oxydulen Affinität, also nicht zu der reduzierenden Gerbsäure, so daß die umgekehrte Methode (Tannin-Eisen-Methode) bei der

*) P. G. Unna. Biochemie der Haut. Jena, Fischer, 1913. p. 65/66.

der Schnitt zuerst in Tannin und dann in Eisenchlorid gebracht wird, die Hornschicht ganz intakt läßt, dagegen auf alles Unverhornte: Kutis + Stachelschicht mit schwarzer (Tinten-)Färbung reagiert."

Unna hat also bei der zeitlichen Umkehrung der Eisen-Gerbsäure-Färbung an den entgegengesetzten Orten die Tintenfärbung konstatiert. Selbst ein so gründlicher und überaus vorsichtiger Chemiker wie der Hamburger Forscher sieht sich genötigt, eine ganze Reihe von spezifischen Affinitäten anzunehmen, um eine Inversfärbung zu erklären, die auf Grund der einzigen Annahme der elektrolytischen Zellzersetzung sicher zusammen mit hundert anderen Beispielen, die man später auffinden wird, genau so und nicht anders erwartet werden mußte.

Im übrigen ist es eine allen Histologen bekannte Tatsache, daß im allgemeinen bei fixierten Präparaten eine Tendenz besteht, Inversfärbungen zu erzeugen. Dort, wo in lebenden oder gerade absterbenden Präparaten Säureorte vermutet werden, in den basophilen Gewebsteilen der Histologen, erscheinen azidophile Orte und umgekehrt. Es ließe sich wohl schließlich rein chemisch verstehen, daß durch Säurefixation ein vorher alkalischer Zellteil sauer wird, aber nicht, daß saure Zellteile nach Säureeinwirkung alkalische Eigenschaften erkennen lassen. Dagegen wird diese Umkehrung durch jede Art des Zelltodes, Säure, Alkali, Neutralgift, Alkohol, Hitze von der elektrochemischen Färbungshypothese wahrscheinlich gemacht. Die Erscheinung ist infolge von sekundären Einwirkungen, von internen Potentialausgleichen mit Elektrolyse der natürlichen Vakuolen und Zellsäfte leider nicht so regelmäßig, wie man sie vom Standpunkte der Elektrohistologie wünschen würde.

Die rein chemische Ausdeutung der histologischen Differenzierungsresultate führt zu den sonderbarsten Schlüssen, weil sie sich mit freiem Auge an den leblosen Bestandteilen der Zelle so schwer nachahmen läßt. So z. B. die bekannte Reduktionsfärbung durch Osmiumsäure, die im mikroskopischen Präparat, namentlich im nicht ganz abgestorbenen, prachtvoll scharf reduziert wird. Wenn man aber die betreffenden Gewebe chemisch in ihre Bestandteile zerlegt, so findet man lauter Stoffe, die Osmiumsäure nicht reduzieren, mit Ausnahme von nicht viel freier Ölsäure, von der es aber keineswegs feststeht, daß sie im unzer-

legten mikroskopischen Präparat in nennenswerter Menge nicht gebunden vorhanden ist. Ebenso unaufgeklärt ist die Wirkung ähnlicher Reduktionssubstanzen, z. B. Eisen-Zyan oder Permanganat auf Muskeln. Es entsteht wieder die Frage, welchen Stoffen sie diese Reduktionskraft nach der extrem chemischen Auffassung verdanken. Unna selber,*) dem wir die prachtvollsten Reduktionsbilder verdanken, wirft diese Frage auf; daß die begleitenden Gewebe, Kollagen und Fett, keinen Anteil daran haben, ist sicher. Ebensowenig kommen die Extraktivstoffe wegen ihrer geringen Quantität in Betracht. Es bleiben also der Hauptsache nach das Myosin selbst, sodann Glykogen und Milchsäure übrig und endlich Lezithin. Milchsäure reduziert gar nicht; Lezithin reduziert wohl Osmiumsäure, aber keine anderen Reduktionsmittel. Die Phosphatide sind aber nach Unna als ein wesentlicher Faktor bei der Reduktion ganz auszuschließen, da eine vorherige Behandlung der Schnitte mit warmem Alkohol-Äther das Permanganatbild fast unberührt läßt, während das Eisen-Zyan-Bild ebenso dunkel oder noch dunkler blau ist als ohne vorherige Entfettung. Es bleiben also nur Glykogen und Myosin übrig. Das Glykogen reduziert zu schwach, ist in zu wechselnder Menge vorhanden und läßt sich mit warmem Wasser ausziehen, ohne das Bild zu verändern. Myosin ist nun tatsächlich ein stark reduzierender Körper. Löst man es heraus, so zeigt es ein starkes Reduktionsvermögen gegen Permanganat und Eisen-Zyan. Es ist aber nicht sehr wahrscheinlich, daß alle Bestandteile des Muskels, die eine Reduktionsfärbung geben, erheblichen Myosingehalt haben.

Daß in den Zellen nicht einfach chemische Kräfte wie in einem unbelebten Laboratorium angenommen werden, ist eine Erkenntnis, die sich immer allgemeiner verbreitet. Auch führende Biochemiker sprechen hie und da den Gedanken an elektrolytische Kräfte aus. Hamburger wurde schon an anderer Stelle zitiert, jedoch Hamburger ist Spezialist im physikalisch-chemischen Arbeitsgebiet, aber auch Abderhalden, vielleicht gegenwärtig der erfolgreichste Eiweißchemiker, der aus den Bausteinen des Eiweißes im Tierkörper synthetisch lebendes Eiweiß produzierte, spricht in der 3. Auflage seines „Lehrbuches

*) Biochemie der Haut. p. 61.

der Physiologischen Chemie"*) von der Wichtigkeit der elektrischen Zellkräfte. Abderhalden sagt: „Wenn es erst gelungen sein wird, jede Energieform in qualitativer und quantitativer Hinsicht mit bestimmten Vorgängen im Zellhaushalt in Beziehung zu bringen, so wird das Zelleben als solches in vieler Hinsicht zahlreicher Rätsel entkleidet sein. Besonders interessant sind die Beziehungen der Oberflächenspannung zur elektrischen Ladung (auch im Original gesperrt gedruckt) der einzelnen Teilchen verschiedener Phasen und umgekehrt. Gleich geladene Teilchen stoßen einander ab und wirken auf diese Weise dem Bestreben der Oberflächenschicht, eine möglichst kleine Fläche einzunehmen, entgegen. Umgekehrt müssen verschieden geladene Teilchen der Aufsuchung der möglichst geringen Fläche günstig sein. Die elektrische Ladung der Teilchen der einzelnen Phasen ist ohne Zweifel noch in vieler Hinsicht von Bedeutung für manche Zellprozesse."

Mit besonderem Nachdruck verweist Abderhalden**) in seinem Lehrbuch an anderer Stelle auf die Beobachtungen von Hardy und dessen Nachfolgern, daß für eine gewisse Stabilität mancher kolloider Zustände eine bestimmte elektrische Ladung notwendig ist. Entzieht man einem gelösten Kolloid seine elektrische Ladung, dann beobachtet man, daß die einzelnen Teilchen sich zu größeren Aggregaten zusammenballen. Schließlich werden sie dem freien Auge sichtbar. Es tritt Ausflockung und Sedimentierung ein. Man bezeichnet den Punkt, in dem gelöste Kolloidteilchen ihre elektrische Ladung verlieren, als den isoelektrischen Punkt. Nicht alle Kolloidlösungen (Sole), z. B. nicht Plasmaalbumin und Hämoglobin flocken bei Erreichung dieses Punktes aus.

Michaelis und Takahaski haben (nach Abderhalden) festgestellt, daß die schädigende Wirkung mancher Elektrolyte und Ionen auf Zellen darauf zurückzuführen ist, daß bestimmte ihrer Kolloide isoelektrisch gemacht werden.

Abderhalden schließt aus zahlreichen Experimenten von Hofmeister, Arrhenius u. a., daß für den momen-

*) II. Teil. p. 830. Wien (Urban) 1915.
**) p. 837.

tanen Zustand kolloider Teilchen (und alle Gewebe bestehen größtenteils aus Kolloiden) „ohne Zweifel ihre elektrische Ladung von größter Bedeutung ist". Abderhalden wirft die Frage auf, ob diejenigen Ionenarten, die einen Einfluß auf die elektrische Ladung kolloider Teilchen haben, zu diesen in irgend welche Beziehungen treten und bejaht diese Frage. Je nach der Natur der aufgenommenen Ionen kann es zu einer erhöhten Ladung der Teilchen kommen oder aber zu einer Abnahme der Ladung, die unter Umständen bis zur Entladung führen kann. Als sicher festgestellt nimmt er an, daß die Kolloide der Zelle eine besondere elektrische Ladung besitzen und diese von großem Einfluß auf manches Geschehen in der Zelle ist. Sicher kommt es auch zur Adsorption von Ionen und damit zu Änderungen der elektrischen Ladung. Eine vollständige Entladung darf freilich nicht eintreten, denn sonst müßten in der Zelle manche Kolloide ausgeflockt werden. (Diese Einschränkung ist vielleicht nicht unbedingt notwendig, es ist denkbar, daß die Verhornung der Epidermis, der Chitinpanzer der Insekten, die Zellulosemembranen der Pflanzen solche Ausflockungen von Kolloiden darstellen.)

Das, was hier als gerichteter, vektorieller Chemismus der Zelle bezeichnet wird, drückt Abderhalden etwa folgendermaßen aus: Das Zustandekommen irgendeines Zellprozesses erfordert neben ganz bestimmten Zustandsänderungen ein fein eingestelltes Zusammenspiel gewisser in der Zelle enthaltener Stoffe (und Kräfte), weshalb wir noch lange nicht alle chemischen Zellreaktionen im Reagensglas nachahmen können.

Einen Fingerzeig für die Elektropolarität der Zellreaktionen gibt auch der Umstand, daß oxydierende Organzellen, z. B. der Nierenglomerulus, wenn sie organische Radikale zusammenkuppeln, dies gewöhnlich zwei elektrisch gleichpolige Verbindungen sind, während in der Laboratoriumschemie gewöhnlich Basen mit Säureradikalen verknüpft werden müssen, und zwei elektronegative saure oder oxydative Radikale im chemischen Laboratorium in der Regel nur auf Umwegen über eine kathodische Verbindung verknüpft werden können. Wer die Stoffumsetzungen in Laboratorium und Technik daraufhin durchsieht, wird zahlreiche Beispiele für diesen Gegensatz finden.

Eine Zusammenkuppelung von Benzol und Schwefelsäure durch gleichzeitige Oxydation des Benzols zu Phenol, ferner die Weiteroxydation des Phenols sind außerhalb der Zelle als einfache chemische Reaktionen ohne Zwischenumsetzung mit Basen einfach unvorstellbar, oder etwa die Ueberführung von Indol zu Indoxyl mit gleichzeitiger Zusammenkuppelung mit einer Säure. Xylol wird in Toluylsäure verwandelt und gleichzeitig an Säuren gebunden, Mesitylen in Mesitylensäure, Zymol wird zu Guminsäure oxydiert. O-Nitrotoluol oxydiert sich zu Nitrobenzylalkohol und paart diese Verbindung mit Glukuronsäure.

MIKROELEKTRISCHE UNTERSUCHUNGSMETHODEN.

Diejenigen physiologischen Chemiker, die sich mit dem Problem der Zellphysik ein wenig befaßt haben, dürften sich heute vielleicht schon in ihrer überwiegenden Mehrheit zu der Anschauung A b d e r h a l d e n s bekennen, daß in den elektrischen Zellkräften die Aufklärung wichtiger Fragen der Biologie verborgen ist. Der negative Teil des Gegenstandes, die Unzulänglichkeit der gegenwärtigen extrem chemisch-analytischen Methode dürfte zurzeit wohl allgemein erkannt sein. Die Frage ist nun die, in welcher Weise die positive Seite dieser Erkenntnis weiterhin ausgebaut werden soll. Ich habe mich in den Jahren 1899 bis 1902 mit großem Eifer bemüht, mikroelektrische Untersuchungsmethoden auszuarbeiten, bin jedoch zu keiner annähernd zuverlässigen Methode gelangt.

Von der Idee ausgehend, daß die histologischen Färbungen der Ausdruck elektrischer Ladungen sind, habe ich versucht, diese Tinktionen in ein System der elektropositiven und elektronegativen Reagentien einzuordnen.

Die Hauptschwierigkeit derartiger Versuche ist die, daß die Teerfarben zumeist amphotere Stoffe und Kolloide sind, die einmal als Base, einmal als Säure auftreten, daß sie von den Gewebsmembranen einmal durchgelassen, einmal abgelehnt werden, und daß ihre Moleküle gewöhnlich zu groß sind, um gewisse Zellgrenzen zu durchdringen. Mein erstes Reagentium war deshalb anorganisch, nämlich G o l d c h l o r i d. Daneben benützte ich D i p h e n y l a m i n für negative Ladungen. Eine Ampèrestunde liefert 2·475 Gramm Gold, unter einer tausendfachen Vergröße-

rung aber ist ein Würfel von ein Tausendstel Millimeter Seitenlänge, der einprozentige Goldkolloidlösung enthält, noch deutlich an seiner tief violetten Farbe zu erkennen. Ein solcher Würfel wiegt ein Billionstel Gramm, er läßt sich theoretisch ableiten als das elektrochemische Äquivalent eines Stromes von einem Hundertstel Billiontel Ampère in der Stunde. Der elektrische Versuch läßt sich nicht bis zu dieser Feinheit herabsetzen und konstant erhalten, indessen gelingt es, mit einem Strom von einem Millionstel Ampère bequem in wenigen Minuten unter dem Mikroskop sichtbare elektrolytische Vorgänge hervorzurufen, insbesondere aber Säurefuchsin, das durch die leisesten Spuren von Alkali entfärbt wird, an der Kathode zu entfärben. Die Empfindlichkeit der gebräuchlichen Galvanometer ist geringer als die der elektrolytischen Zersetzung unter dem Mikroskop.

In der Praxis aber steht man bei so komplizierten Objekten, wie es lebende oder fixierte Präparate sind, immer vor der Frage, ob chemische oder elektrische Ursachen das Goldsalz reduzieren, oder, vom Standpunkte der elektrochemischen Auffassung, ob das Goldchlorid, was nahezu sicher erscheint, zuerst tötet und dann elektrolysiert wird, oder zuerst elektrolysiert wird und dann tötet. Beide Eventualitäten können nach dem Grundsatz des elektrochemischen Akkumulators entgegengesetzte Bilder erzeugen. Der Moment der Fixation läßt sich nicht festhalten. Die Farbstoffe aber, die lebende Gewebe tingieren, haben sich als wenig verläßlich gezeigt. Namentlich Methylenblau erzeugt diffuse Färbungen auf Stellen, die ich ganz sicher für starke Elektrizitätspole halten mußte. Nach Ehrlich und Unna wird es von gewissen Punkten reduziert und entfärbt. In der lebenden Zelle arbeitet vermutlich eine solche Vielheit von galvanischen Strömen und statischen Potentialdifferenzen, daß sehr leicht ein elektrostatisches Kraftfeld einen ganzen großen Zellteil von dem Zutritt eines Farbstoffes abhalten kann, — auch in einer Zelle, die schon zur Hälfte abgestorben ist. Die Sauerstoffflächenbilder Unnas um die Kerne herum lassen darauf schließen.

Daneben können auch mechanische Oberflächenspannungen störend einwirken. Ferner ist es eine bekannte Tatsache, daß eigentlich nur basische Farbstoffe vital färben können, bei saueren ist die Giftigkeit und Impermeabilität die Regel.

Um die große Wirkung der Elektrizität auf die Färbbarkeit zu demonstrieren, habe ich Elodeapflanzen*) einmal als Anode mit etwa 8 Volt Klemmspannung kleiner Chromsäure-Elemente, einmal als Kathode und einmal zur Kontrolle ohne äußere Stromzuführung in ½prozentige Goldchloridlösung getaucht. Es gelang mir damit manchmal, aber nicht regelmäßig, deutlich umgekehrte Färbungen zu erzielen, die an anderen Objekten von Bethe und von Cremer erzielt wurden. Die Versuche beweisen nicht viel, weil man sich chemische Zwischenwirkungen vorstellen kann, die durch die erzeugten Säuren und Alkalien der Elektroden hervorgebracht werden. Ferner gelingen sie nicht regelmäßig, weil es überhaupt mangels jeder Elektro-Topographie der Gewebe und wegen ihrer Feinheit schwer ist, immer dieselbe Gewebeart des Pflanzenstengels mit der Elektrode zu verbinden. Die ganzen unverletzten Pflanzen zu durchströmen, ist mit schwachen Strömen, wie schon früher erwähnt, ziemlich aussichtslos.

Ich habe ferner Rosenzweige in Farbstofflösungen unter der Spannung einer Lichtleitung von 120 Volt durchströmt und die Elektrode an einen Seitenzweig angelegt, während der Stammquerschnitt in die Lösung tauchte. Es gelang mir dadurch, den betreffenden Zweig, der sich am Stammquerschnitt kenntlich macht, isoliert auf seiner Stammleitung auszufärben. Gegen diesen Versuch, der sehr hübsche Präparate liefert, läßt sich einwenden, daß so hohe Spannungen unphysiologisch sind und daß die bloße kataphoretische Wirkung des Stromes genügt, um das isolierte Ausfärben des Zweiges zu erklären. Wie schon an anderer Stelle ausgeführt, ist es keineswegs sicher, daß der Teil des Spannungsgefälles, der auf ein Zellelement entfällt, eine höhere Spannung hatte als unter natürlichen Verhältnissen. Die Wirkung so hochgespannter Ströme auf den lebenden Menschen ist allerdings deutlich abnormaler Natur.

Wenn diese Versuche für meine Anschauung, daß die mikroskopischen Färbungen größtenteils auf elektrochemischem Wege zustande kommen, nicht von erheblicher Bedeutung sind, so könnten sie doch für die histologische Technik wertvoll werden, wenn es sich darum handelt, isolierte Bahnen ge-

*) Elodea canadensis. (Wasserpest.)

sondert auszufärben. Man müßte das ganze Organ von dem Farbstoff in schwacher Lösung durchströmen lassen und dann eine separate Nervenbahn isoliert stärker ausfärben. Die Erforschung der Lokalisation der Hirnzentren und der Neuronen-Bahnen würde dadurch ein Mittel von entscheidender Deutlichkeit erhalten.

Daß in der histologischen Technik die Elektrizität geradezu boykottiert ist, nicht nur die statische, sondern auch die galvanische, habe ich immer sehr bedauert. Abgesehen von der Einseitigkeit der rein optischen Beobachtung bloßer Äußerlichkeiten, die dadurch in ganzen Studentengenerationen geradezu herangezüchtet wird, berauben sich die Histologen dadurch einer großen Reihe von technischen Vorteilen, die die elektrischen Apparate bieten, die aber in histologischen Laboratorien nicht angewendet werden können. Im großen und ganzen läuft die zeitraubendste Arbeit der Histologen darauf hinaus, die gallertartigen Objekte dauerhaft und schneidbar zu machen, etwas, was dem Gerben der Lederindustrie sehr nahe kommt. In der Gerbereitechnik ist man längst auf den elektrischen Betrieb übergegangen; wenn man z. B. Häute mit Chromverbindungen härten will, eine Aufgabe, die der histologischen Technik sehr nahe kommt, so läßt man das Chrom elektro-kataphoretisch in die Zellen eindringen, wodurch der Härtungsprozeß, der früher monatelang dauerte, auf Stunden reduziert wurde. Wenn man einige Arbeit auf die Anpassung elektro-kataphoretischer Prozesse für histologische Objekte verwenden wird, so wird man gewiß Verfahren finden, welche die Härtung beschleunigen, ohne die Strukturen zu schädigen oder zu zerstören.

Ich habe mich besonders mit Pflanzen bemüht, weil pflanzliche Objekte leichter in Teilstücken lebend erhalten werden können und weil ich in ihnen stärkere Potentialdifferenzen vermutete als in den zumeist membranlosen Tierzellen.

Meine Versuche, die ich im Jahre 1902 — ziemlich entmutigt — aufgegeben habe, können nicht als beweiskräftig dafür angesehen werden, daß man mit Farbstofftinktionen allein elektrolytische Mikroanalyse betreiben kann. Es treten viele osmotische und kolloidchemische Sekundäraktionen im lebenden Gewebe auf, so daß man niemals sicher ist, ob man eine Wirkung einer elektrischen Potentialdifferenz erblickt oder sekundäre

(eventuell durch Entspannung und Schädigung der Zelle erzeugte) entgegengerichtete elektrische oder Oberflächenkräfte. Das aber ist als feststehend zu betrachten, daß die Art, in der man, zu jener Zeit wenigstens, mikrochemische Analytik betrieb, ohne auf die zweifellos existierende elektrische Polarität der einzelnen Zellteile Rücksicht zu nehmen, fehlerhaft ist. Wenn es also nicht sicher ist, daß die Färbungen einfach elektrolytische Reaktionen sind, so ist es dafür nicht zu bezweifeln, daß man makroskopische Reaktionen nicht einfach auf histologische Präparate übertragen kann. Man darf also nicht, wenn beispielsweise Diphenylamin von der Zelle zu Diphenylaminblau oxydiert wird, auf die Anwesenheit von Salpetersäure schließen, wie man es in der Eprouvette zu tun gewohnt ist. Fast jede neue mikrochemische Arbeit zeigt, daß solche und ähnliche Methoden noch gebräuchlich sind.

Eine Zeitlang habe ich mich bemüht, den mikroskopischen Elektrizitätsnachweis auf lebenden Objekten mit Hilfe der elektrostatischen Bestäubung sichtbar zu machen. Die Bestäubungsmethode rührt von Kundt (1883) her, dem es gelang, die Elektrizitätswirkungen pyroelektrischer und piëzoelektrischer Kristalle damit genau darzustellen. Kundt und seine Nachfolger verwandten Pulver aus Isolatoren, die nach ihrer chemischen Natur eine bestimmte Ladung besitzen und festhalten und die infolgedessen von elektrisch geladenen Körpern angezogen und abgestoßen werden. Als Reagens für positive Elektrizität dienen Schwefelblumen oder Kieselsäure, für negative Pulver Mennige oder Eisenoxyd, welche auf die zu untersuchenden Objekte gestäubt werden. Ich verwandte zur Kontrolle noch feinstes Aluminiumpulver, d. i. ein Leiter, der sich sofort gleichnamig lädt und von allen statischen Elektrizitätsquellen, ob nun positiven oder negativen, stark abgestoßen wird. Das Arbeiten mit allen diesen Pulvermethoden ist nicht besser als jenes mit Teerfarben, weil die physiologischen Objekte sehr viele besondere Fehlerquellen darbieten; in Luft arbeitet es sich sehr schlecht, alle anderen leichtflüssigen Isolatoren Terpentinöl, Alkohol, Äther greifen das Objekt stark an und bringen Strömungen hervor. In Wasser oder einem Leiter ist die elektrostatische Wirkung naturgemäß Null. Ich hatte den Eindruck, daß die Ladungen der lebenden Objekte, die sie aus physiologischen Gründen haben, ihre Eigenladungen

(im Gegensatz zu den zufälligen Aufladungen durch Luftelektrizität oder sonstwie) nicht stark genug sind, um die Pulverreaktion deutlich zu machen.

Ein weiteres Mittel elektrostatische Ladungen unter dem Mikroskop nachzuweisen, wird sich vielleicht aus der Beobachtung gewinnen lassen, daß Kristalle unter dem Einfluß einer elektrischen Ladung eine bestimmte Achseneinstellung annehmen (zuerst makroskopisch von Knoblauch festgestellt). Wenn man frische Pflanzenzellen mikroskopiert, so findet man die natürlich vorkommenden Kristalle der lebenden Zelle immer in derselben Achsenlage, als ob sie unter einem arteigen gerichteten elektrostatischen Kraftfeld entstanden wären; leider aber fand ich keinen mikroskopischen Kristall, der sich befriedigend asymmetrisch verhalten hätte, d. h. der auf dem positiven Felde sich deutlich anders einstellt als auf dem negativen Felde.

Am brauchbarsten für den Zweck einer elektrostatischen Mikroanalyse durch Kristalldrehung erscheint mir noch der Struvit, der eine auch am mikroskopischen Objekt sehr deutliche Asymmetrie in der Richtung seiner elektrischen Achse aufweist. Indessen bin ich auch mit diesem Körper nicht glücklicher gewesen, als mit den anderen asymmetrisch elektrischen Kristallen, mit denen ich arbeitete, mit Rohrzucker, Milchzucker, Rechtsweinsäure. Der Kristallversuch, genügte mir gerade nur, um in manchen Präparaten statische Ladungen festzustellen, ich brachte es aber nicht dazu, positive oder negative Ladungen zu unterscheiden. Da aber in der atmosphärischen Luft alle Körper zufällige und wechselnde Ladungen annehmen, so ist das Ergebnis solcher Versuche nicht bemerkenswert.

Einen einzigen Versuch habe ich so anstellen können, daß er immer gelingt und die Tatsache der arteigenen elektrostatischen Zelladungen verdeutlicht. Wenn es lebenswichtige elektrostatische Ladungen gibt, so war anzunehmen, daß beim Pollenstaub der Pflanzen diese Ladungen sich im Normalzustand nach außen geltend machen. (Seither haben Jaques Loeb und seine Schule in glänzenden Versuchsreihen nachgewiesen, daß die elektrostatischen Ionenladungen bei den Befruchtungsvorgängen eine entscheidende Rolle spielen.) Ich habe nun möglichst frischen und reifen Pollenstaub von Tulpen und anderen Blumen auf dem Objektträger des Mikroskops zwischen Stanniol-

blättchen durch eine Reibungselektrizitäts-Maschine polarisiert. In dem Augenblicke, in dem jemand an der entfernten Maschine eine langsame Drehung macht, ordnen sich die nicht beschädigten Pollenstaubkörner in bestimmter arteigener Weise. Man darf nicht zu schnell drehen, weil sonst die Körner zu wild hin- und hergeworfen und durch Funken oder sonstwie zerstört werden. Bei langsamer Drehung der Eelektrizitätsmaschine nehmen die nicht beschädigten Pollenzellen durch Fernwirkung eine bestimmte Achseneinstellung im elektrostatischen Feld ein. Zumeist wirken benachbarte Körner gegenseitig aufeinander ein und ordnen sich durch Abstoßung und Anziehung zu Ketten, die aneinander haften bleiben, auch wenn die Maschine bereits stillsteht und die ich deshalb photographieren konnte. Es lassen sich also an jedem lebenden Pollenkorn natürliche positive und negative Ladungszonen erkennen. Daneben sieht man vereinzellt Pollenkörner liegen, die von dem elektrischen Feld nicht berührt werden. Es sind dies entweder unausgereifte oder abgestorbene Pollenzellen. Die große Mehrheit der Pollenkörner reagiert sehr deutlich im elektrostatischen Feld. Der Versuch beweist, daß selbst das einzellige Pollenkorn elektrostatisch noch ein sehr differenzierter Körper ist. Da bei den Befruchtungsvorgängen die elektrostatischen Wirkungen sich offenbar auf scharf umrissene Punkte nach außen polarisieren, so ist man bei dieser Zelle ausnahmsweise in der Lage, eine regelmäßige elektrostatische Ladung im Normalzustand nach außen sichtbar zu machen, ein Problem, das sonst mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist.

Nach meinen zahlreichen Bestimmungen am Quadranten-Elektrometer möchte ich annehmen, daß die statischen Spannungen der lebenden Zellen sich in der Größenordnung von mindestens 1 Volt bewegen. Ich erhielt niemals kleinere Ausschläge als 1 bis 2 Volt. Sie wären demnach ungefähr eine Größenordnung höher als bisher elektromagnetische Spannungen an lebenden Objekten gefunden wurden. Es sind auch andere Umstände, die mich zu der Vermutung gebracht haben, daß die normalen elektromotorischen Kräfte diese Höhe erreichen und sogar übersteigen.



EINE ELEKTRO-HISTOLOGIE.

Nach dieser Aufzählung scheinen die Aussichten für den Ausbau einer mikroskopischen Elektrizitäts-Bestimmungsmethode nicht gerade glänzend. Meine Mißerfolge hatten aber viele Gründe, die nicht in der Natur der Sache liegen. So zum Beispiel ist meine Farbenblindheit ein schweres Hindernis für das Arbeiten mit Teerfarben. Ich bin dadurch sehr irreführenden und zeitraubenden Täuschungen ausgesetzt gewesen. Ferner besaß ich zu Beginn meiner Arbeiten und später noch lange nicht jene Fertigkeit und Erfahrung in der mikroskopischen Technik, die das Arbeiten sehr erleichtert. Das für das Aufsuchen von Kri-

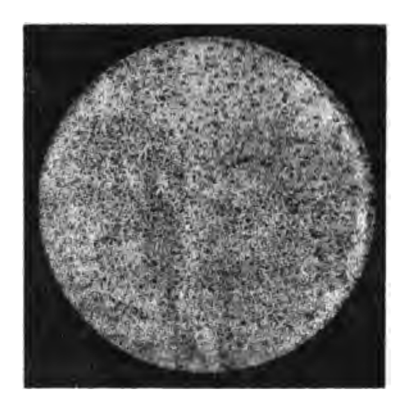


Fig. 7. V. Quecksilberkugeln.
1 Teil Okularmaßstab = 11,5'10—5 cm. 582 fache Vergrößerung.

stallachsen notwendige Polarisationsmikroskop ist für einen Farbenblinden nahezu unverwendbar.

Ich setze sehr große Hoffnungen für den mikroskopischen Nachweis statischer Bioelekrizität auf eine neue Apparatur Prof. Ehrenhafts,*) der sich damit beschäftigt, ultramikroskopische Elektrizitätsladungen an Metallnebeln, die er vorher statisch geladen hat, auszumessen, bezw. auszuwägen.

Von dem hier nachfolgenden Bild (Fig. V, Tafel XIV) hat Ehrenhaft die Ladungen bestimmt.

Er bringt einige Photographien von 1380facher Vergrößerung, die jedes einzelne Metallkügelchen scharf wiedergeben;

*) Ehrenhaft. Die Quanten der Elektrizität. Der Nachweis von Elektrizitätsmengen, welche das Elektron unterschreiten. Anm. d. Physik. IV. Bd. 44. 1914. p. 659.

für bloße qualitative Beobachtung würden auch Dunkelfeldbilder mit noch stärkerer Vergrößerung genügen, die immer noch an der Farbe die Metallverteilung erkennen lassen. Naturgemäß ist Ehrenhafts Verfahren ungeheuer kompliziert, aber es ist nicht unmöglich, daß es trotzdem für physiologische Objekte nutzbar gemacht werden kann. Gegenwärtig müssen diese elektrisch geladenen Metallnebel über blankem Natrium, über Schwefelsäure und anderen Materialien von der letzten Spur von Sauerstoff und Feuchtigkeit befreit werden, ehe sie ihre Ladung genau bestimmen lassen. Für bloße qualitative Versuche, wie sie die Elektrophysiologie zunächst braucht, wird aber vielleicht eine einfachere Herstellung genügen. Die Erfahrung wird nach einiger Zeit ergeben, wie hoch sich die Nebel unter bestimmten Versuchsanordnungen zwischen den Kondensatorplatten laden und wie hoch ungefähr die Ladung der physiologischen Gewebe ihnen gegenüber geschätzt werden kann.

Auch in anderer Beziehung hat sich in den seither verflossenen 15 Jahren die Instrumenten-Technik gewaltig verbessert und verfeinert. Die Elektrometer, die damals durch atmosphärische Elektrizität bis zur Unkenntlichkeit der normalen bioelektrischen Ladung gestört waren, sind heute mit Schutzwehren gegen atmosphärische Einflüsse ausgerüstet. Kurz, ein Berufsphysiologe oder -histologe, der heute mit den verbesserten und erweiterten Methoden an diese große und wichtige Aufgabe herantritt, hat die sichere Aussicht, der Begründer einer neuen, lebenswichtigen Wissenschaft zu werden, der Elektrohistologie, der Lehre von den elektrischen Ladungen und Strömen der Zelle, die erst der rein optischen und chemischen Histologie den energetischen Inhalt geben kann. Die Elektrohistologie wird der Grundstein werden zu einer ganzen Reihe von Entdeckungen anderer Wissenschaften, der Pflanzenphysiologie ebenso wie der tierischen Physiologie, Pathologie und Biologie.

Die Aufgabe der neuen Wissenschaft ist eine sehr schwere, aber sie ist viel leichter, als sie noch vor zehn Jahren war und sie wird sehr leicht werden, wenn die nächste Etappe überwunden sein wird.

Zunächst müssen mit nicht körperfremden Stoffen, also mit solchen, die zum Ersatz arteigener Nahrungssalze oder Nahrungsmittel dienen, die aber analytisch leicht aufgefunden wer-

den können, die Polaritäten der vitalen Zelle erforscht werden. Wahrscheinlich wird sich herausstellen, daß z. B. Jodnatrium, das von Zellen statt des normalen Chlornatriums leicht aufgenommen wird und das in Gefrierschnitten von Minute zu Minute in seinem Eindringungsweg sichtbar gemacht werden könnte, mit seinem Anion Jod genau dieselben Anodenpunkte ausfärben wird, wie Unnas Färbung der Sauerstofforte.

Inzwischen sind sehr große Zellen aufgefunden und untersucht worden, die anscheinend eine starke Elektropolarität aufweisen, z. B. das Rhychelmis-Ei (von Vejdovsky und Mrazek beschrieben), an denen es vielleicht möglich sein wird, mit einem feinen Platindraht die Elektrizitätsladungen direkt mit dem Elektrometer unter mittlerer Vergrößerung abzutasten und mit dem Färbungsbild zu vergleichen.

Das Arbeiten mit dem Quadranten-Elektrometer ist allerdings bei so kleinen Objekten nicht leicht. Wahrscheinlich aber sind die Potentialdifferenzen groß genug, um sie mit dem Kapillar-Elektrometer oder wenigstens mit dem Galvanometer fassen zu können, für dessen Behandlung eine feststehende physiologische Technik sich herausgebildet hat. Nun braucht man nicht mehr, als an zwei oder drei verschiedenen Geweben an Pflanzen oder Tieren die volle Übereinstimmung gewisser Färbungen, z. B. von Unnas Sauerstoff- und Reduktionsorten mit den elektrischen Ladungen zu erweisen und die weitere qualitative Bearbeitung wird dann sehr leicht sein. Steht einmal fest, woran ich keinen Augenblick zweifle, daß nämlich die Färbungen Unnas und gewisse andere Tinktionen und die elektrischen Meßresultate qualitativ übereinstimmen, so genügt dann die bequeme Färbungsmethode vollständig für einen allerdings nur qualitativen Atlas der Elektrohistologie.

Die elektrischen Meßapparate werden dann nur mehr zur quantitativen Erfassung der Ladungen notwendig sein. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß weitere Versuche einen gewissen quantitativen Zusammenhang zwischen gewissen Mehrfachfärbungen und der elektrischen Ladungsspannung ergeben werden, so daß man nach dem färberischen Ergebnis vielleicht einmal auch auf gewisse Grenzwerte der normalen Spannung wird schließen können.

MIKROSKOPISCHE UND ULTRAMIKROSKOPISCHE KRAFTWIRKUNGEN.

Zur Erläuterung dessen, was mir als Resultat elektrohistologischer Experimente vorschwebt, gebe ich ein Kapitel aus meinen 1912 erschienenen „Elektrostatischen Zellkräften" wieder. Die seitherige Entwicklung der Physik und der Biologie hat manches gebracht, das ich als Bestätigung meiner Anschauungen deuten könnte.

Jeder, der sich mit einer Versuchstechnik für elektro-chemische Bestimmungen an lebenden Zellen beschäftigt, wird die Erfahrung machen, daß für solche Experimente unsere bisherigen physikalischen Untersuchungsmethoden und unsere bisherigen Apparate nicht ausreichen. Die elektrischen Potentialdifferenzen in der Zelle haben so ganz andere Größen und Konstitutionen als die anorganischen Objekte, daß es nicht so leicht ist, als man denkt, die ersten Schritte auf diesem von Theorie und Experimentierpraxis so sehr vernachlässigten Gebiete erfolgreich zu gestalten. Wäre es anders, so wäre die Elektrochemie der Zelle längst durchgearbeitet und in ihren Hauptumrissen begründet. Aber das Ziel ist so lockend und wird so sicher ungeahnte Ausblicke eröffnen, daß sich kein aussichtsreicheres Feld für die Arbeit der jüngeren Generation erdenken läßt.

Bei solchen Untersuchungen wird man finden, daß auch die rein physikalische Forschung jene kleinen mikroskopischen Gebiete vernachlässigt hat, unter denen sich das Leben der Zelle abspielt. Wir haben eine astronomische Physik für die Fernrohr-Distanzen, eine makroskopische Physik für die Entfernungen des freien Auges, wir haben eine Molekularphysik für die Entfernungen jenseits der mikroskopischen Sichtbarkeit, aber eine Mikrophysik haben wir nicht — bis auf die schwachen Anfänge einer Kapillarchemie, die sich aber nur auf die Oberflächenenergie beschränkt.

Es ist nämlich nicht gleichgültig, ob sich eine Energiewirkung in gewöhnlich sichtbarer, in molekularer oder in mikroskopischer Entfernung abspielt. Gerade physiologisch sehr wichtige Kräfte kehren in gewissen kleinen Entfernungen ihr Vorzeichen um, oder nehmen Intensitäten an, die unvorstellbar groß sind

gegenüber den uns aus der Sichtbarkeit mit freiem Auge bekannten Intensitäten. Ist es doch, um an eine der bekanntesten Erscheinungen zu erinnern, augenfällig, daß mikroskopischer Staub ebenso leicht nach oben fällt wie nach unten. So aber wie in den astronomischen Entfernungen die Richtkräfte unserem Sehen ungewohnte Bilder erzeugen, so kann man nicht erwarten, in mikroskopischen Distanzen die gewohnte Linie der Kraftwirkung unverändert zu finden.

Befangen durch die Erfahrungen unserer Sinne sind wir gewohnt, die Reibungselektrizität, die unter freiem Auge höchstens Hollundermarkkügelchen bewegt, als eine spielerisch schwache Kraft zu betrachten, die starke, lebenswichtige Bewegungen unmöglich ausführen kann. Das Bild ändert sich jedoch gründlich, wenn man elektrostatische Anziehung und Abstoßung unter dem Mikroskop betrachtet. Die Intensität der Wirkung der statischen Elektrizität wächst ebenso wie die des Magnetismus und der Gravitation mit dem umgekehrten Quadrat der Entfernung. Sie wirkt also auf ein Hundertstel Millimeter Entfernung, in der Zellenentfernung millionenfach stärker als auf einen Zentimeter namentlich dann, wenn sie sich flächenhaft kondensieren kann. Eine solche Intensität einer Kraft können wir uns mit unseren Sinnen nicht mehr vorstellen und das Auge ist nicht mehr imstande, die Bewegung eines mikroskopischen Pulvers unter der Spannung einer Elektrisiermaschine nach ihrer Richtung zu erkennen. Man erblickt gewöhnlich nur ein unentwirrbares Durcheinander von angezogenen und abgestoßenen Körperchen. Ist aber die Wirkung der statischen Elektrizität, die schon bei der Entfernung von einem Zentimeter im Goldblattelektroskop die Schwere leicht überwindet, in den mikroskopischen Dimensionen der lebenden Zelle so ungeheuer stark, so wird sie noch unfaßbarer in jenen unsichtbaren kleinen Räumen, in denen sich das Leben der Protoplasma-Bestandteile abspielt.

Auch andere Energien wachsen mit dem Quadrat der Nähe, zum Beispiel die Gravitation, aber diese ist keine Flächenenergie, sondern sie ist nach einem geläufigen geometrischen Bild in einem inneren Schwerpunkt konzentriert gedacht. Wenn also auch bei der Gravitation die Massenanziehung mit größerer Nähe nach dem Verhältnis der zweiten Potenz steigt, so werden zugleich die Gewichte der anziehenden Massen, die ja Volumein-

heiten sind, nach dem Verhältnis der dritten Potenzen kleiner, das heißt, das Gesamtmoment der Gravitation wird auch in der größten Nähe kleiner. Anders bei der elektrostatischen Energie, bei der das gesamte Kraftmoment eines größeren Volums in einer molekularen dünnen Fläche oder gar in einem Punkt konzentriert sein kann, wenn sich, wie in der physiologischen Welt, Zelloberflächen oder Organflächen begegnen. In solchen Flächen können unvorstellbar intensive Bewegungskräfte auftreten, auch wenn die elektromotorischen Kräfte nur klein sind.

H. Isovesco hat nach Literaturhinweisen, deren Originale mir nicht zugänglich sind (Compt. rend. de la Société de Biologie 60, 1906, ferner Etudes sur les humeurs de l'organisme, Paris 1906), sich mit statischen Ladungen organischer Kolloide beschäftigt und unter anderem die Nichtgerinnung des Blutes im lebenden Körper auf die Negativität der Gefäßwände zurückgeführt.

In mikroskopischen Entfernungen werden vor allem jene Kräfte sehr starke Wirkungen äußern können, deren Intensität sich flächenförmig, linienförmig oder gar punktförmig konzentriert, namentlich solche, welche das gesamte Kraftmoment einer größeren Masse in einem nahen Punkte außerhalb ihrer eigenen Ausdehnung konzentrieren können. Eine solche Kraft ist vor allem der Magnetismus, der unter physiologischen Verhältnissen (unmittelbare Nähe und Konzentration erheblicher magnetischer Massen in punktförmige oder linienförmige Pole) möglicherweise große Effekte hervorbringen kann. Alle organische Körper sind in einem sehr geringen Grade diamagnetisch, unter Umständen können sie sich jedoch in einem Medium von differentem Diamagnetismus auch paramagnetisch verhalten. Die Gesetzmäßigkeiten des Atom- und Molekularmagnetismus sind erst in den letzten Jahren eingehend untersucht worden. Es haben sich dabei so auffallende Beziehungen mit anderen additiven Eigenschaften der Atome ergeben, unter anderem eine so scharfe Wirkung verschiedener Kohlenstoffbindungen in organischen Verbindungen, daß man mit Hilfe von magnetischen Analysen strittige Strukturformeln in ihrem wahren Aufbau erkennen kann. Eine Zusammenstellung der Forschungen auf diesem interessanten Gebiete bringt die „Magnetochemie" von E. Wedekind (Berlin, Gebrüder Borntraeger, 1911), die auch be-

reits die neue Elektronen-Theorie des Magnetismus, die Magnetonen-Theorie von Pierre Weiß, in einem kurzen Abriß darstellt.

Physikalische Untersuchungen darüber, ob scharfe Stromlinien, wie sie in den physiologischen Objekten gefunden werden, imstande sind, gelösten Kolloiden einen Bewegungsimpuls zu geben, habe ich nirgends gefunden. Die Ultramikroskope müßten erkennen lassen, ob größere asymmetrische Kolloide durch elektromagnetische Fernwirkungen nicht wenigstens einen inneren, rotatorischen Impuls erhalten. Es wäre dies für die physikalisch-chemische Aktion von Eiweißmolekülen im lebenden Objekt von einiger Bedeutung, namentlich für den Mechanismus gewisser Enzym- und Antitoxin-Wirkungen, die im lebenden Objekte oft im entgegengesetzten Sinne beobachtet werden wie außerhalb des Organismus.

Die Reizwirkung magnetelektrischer Induktion auf Nervmuskelpräparate durch Fernwirkung ist bereits experimentell festgestellt worden.

Wenn man die festgestellten Tatsachen der Elektronenlehre auf die wichtigsten Protoplasma-Aktionen überträgt, so erhält man auf Grund der heutigen Biochemie etwa folgendes Bild: das Protoplasma schaltet aus seinem komplizierten unbekannten Aufbau arteigene Atomkomplexe ab, welche in dem flüssigen Medium unter bestimmten Temperatur- und Druckverhältnissen arteigene Schwingungsbewegungen ausführen müssen. Diese Atomkomplexe (Enzyme und Toxine) sind imstande, ziemlich different zusammengesetzte, in einem ziemlich differenten Rhythmus schwingende Atomkomplexe zu Bausteinen zu zertrümmern, aus denen sie selbst oder andere Molekülkombinationen desselben Organismus auf der anderen Seite des Verdauungskanals jene arteigenen Atomkomplexe zusammenfügen, welche wieder in dem arteigenen Rhythmus des betreffenden Körpers schwingen. In diesem Bild ist keine neue Annahme enthalten, es ist nichts als die Uebertragung der chemischen Anschauungen der Schule von Paul Ehrlich auf die bisher experimentell sichergestellten Ergebnisse der Untersuchung von Elektronen, wobei die hypothetischen Schwingungen der Elektronen der Seitenketten des Eiweißmoleküls um die Leistungskerne der Seitenketten-Atome, nicht berücksichtigt sind, um die Bewegung zu vereinfachen.

Auch außerhalb des Körpers werden die schwingenden Atomkomplexe des Enzyms in einem gewissen Richtungssinne dem Substrat zugeordnet sein. Mathematisch ausgedrückt, wird die ausgeübte Kraft auch in vitro eher eine vektorielle als eine skalare Kraft sein.*)

Meine Annahme besteht nun darin, daß im lebenden Organismus ruhende oder bewegte elektrostatische, eventuell elektromagnetische Kraftfelder von arteigener Masse und arteigener Intensität diese Bewegungen orientieren, daß es also möglich ist, daß dasselbe Enzym durch Umkehrung seines Drehungssinnes jenseits der Darmwand unter entgegengesetzter elektrischer Orientierung jene Atomkomplexe zusammenfügen kann, die es diesseits der Darmwand abgebaut hat. Es ist dies eine bei Kräften, deren Natur die Definition eines polaren Vektors hat, leicht verständliche Erscheinung. Um bei dem Bilde von Emil Fischer zu bleiben, der Enzym und Eiweißmolekül, Toxin und Antitoxin mit Schlüssel und Schloß verglichen hat, so müßte man dieses Bild dahin ergänzen, daß der Schlüssel nach rechts das Schloß aufschließt, oder eigentlich aufsprengt, nach links zuschließt oder richtiger zudreht.

Die Bewegung, die ein elektromagnetisches Kraftfeld einem Kolloid mit arteigenem Schwingungsrhythmus zuordnet, muß in dem von hundert anderen schwingenden Komplexen erfüllten Medium äußerst kompliziert sein. Im allereinfachsten Elementarfall wird sie sich auf eine Schraubenlinienbewegung reduzieren lassen. Die Rechtsschraube würde dann komplementäre Seitenketten asymmetrischer Natur (asymmetrisch nicht im gewöhnlichen stereochemischen Sinne) entgegengesetzt bewegen wie die Linksschraube.

Die Verdauungs- und Toxinwirkungen gewinnen durch diese Vorstellung nicht erheblich an Deutlichkeit. Was unerklärlich war, bleibt weiter unerklärlich. Es wäre jedoch nützlich, wenn man an der Hand dieser Vorstellungen versuchen würde, durch Experimente zu bestimmen, inwieweit sich beispielsweise Enzym-

*) Ueber die Elektronentheorie orientiert man sich in Abrahams Elektronentheorie in der Teubnerschen „Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften". Das zweibändige Werkchen enthält auch eine Einführung in die Vektormathematik, deren Methoden der große Aufschwung der mathematischen Physik der letzten Jahrzehnte zu danken ist.

wirkungen durch elektrostatische oder elektromagnetische Kraftfelder oder durch Strahlen elektrischer Natur, welche aufgeladene elektrostatische Felder entladen, beeinflußen lassen. Für die häufigste Strahlenart, für die hellen Wärmestrahlen ist dieser Einfluß durch zahlreiche Experimente bereits festgestellt, ebenso für Radiumstrahlen, nur läßt sich dagegen einwenden, daß die Einwirkung primär photochemischer oder chemischer Natur ist und erst sekundär die organischen Reaktionen erzeugt. Helen Chamber und J. Russ (Proc. Royal Soc. Bd. 84, 1911, p. 124) haben Radiumstrahlen auf Blut einwirken lassen. Bei Bestrahlung mit Alpha-Strahlen wurden die roten Blutkörperchen hämolysiert, die Opsonine und das Komplement verschwanden aus dem Serum. Die anderen Strahlen des Radiums blieben wirkungslos. — Nach einem Referat im Journal de Physiologie et Pathologie (72, 2, 1912) hat J. Giaza gefunden, daß ultraviolette Strahlen die Aktivität des Emulsins von Helixsaft vernichten.

Die Entdeckung, die Molisch in der Sitzung der Wiener Akademie vom 7. März 1912 mitteilte, daß Radiumstrahlen Winterknospen zur sofortigen Entwicklung bringen, paßt sehr gut zu dem Schema der statisch-chemisch-elektrischen Organisation des Stoffwechsels. Man hätte sich darnach vorzustellen, daß der trockene Pflanzensamen Isolationssubstanzen enthält, die im Frühjahr durch Wärme und Sonnenstrahlen in Verbindung mit Wasserdampf ionisiert werden, aber auch durch Emanationsstrahlen ebenso bis zu jenem Grade leitend gemacht werden, daß die elektrostatischen Potentiale in Bewegung geraten.

EINIGE TATSACHEN DER NEUEN ATOMPHYSIK.

Man sollte sich nicht mit der Betrachtung des Mechanismus der Zellvorgänge befassen, ohne mit den Forschungen des jüngsten Zweiges der Atomphysik und der Elektronenphysik fortwährend in Fühlung zu bleiben. Es ist nicht jedermanns Sache, sich mit den fruchtbaren theoretischen Resultaten zu befassen, welche das Zusammenstimmen zwischen theoretischer Vorausberechnung und experimenteller Nachprüfung ergeben haben. Viele der Elektronen-Hypothesen sind heute schon innerlich gefestigter und an der Erfahrungswelt genauer nachkontrolliert als jene chemischen Hypothesen, mit denen die Biochemiker zu

arbeiten gewohnt sind. Einen Gesamtüberblick über die Arbeiten dieses Gebietes an der Hand seiner Hypothese der Valenzelektronen gibt J. Stark in seiner dreibändigen „Atomdynamik,*) eine kurze, die neueste Zeit bis Anfang 1917 umfassende Uebersicht gibt die Arbeit desselben Autors „Die Träger der Spektren der chemischen Elemente".**)

Ueber die Bindung der Atome und Atomgruppen untereinander durch Starks schwingende „Valenzelektronen" mag man denken wie man will — sicher gibt Starks Hypothese ein sehr brauchbares Bild der durch die jüngsten Experimente aufgedeckten neuen Tatsachenwelt — diese Erfahrungstatsachen selbst jedoch darf heute niemand mehr ignorieren, der sich mit den Lebensvorgängen der Zelle und ihrer Organellen beschäftigt. Vielleicht läßt sich für die Biochemie als das augenblicklich am wichtigsten scheinende Neue die unbezweifelbare Tatsache bezeichnen, daß auch die Spektraluntersuchung und die magnetische und elektrische Analyse der isolierten gasförmigen Atomionen ergeben hat, wie viel wichtiger und kennzeichnender der elektrische Zustand eines Atoms ist als der bloße chemische Charakter. Stark drückt dies in dem obigen Referat***) etwa folgendermaßen aus: „An dem neutralen Atom kommen somit negative Elektronen vor und, wie alle bis jetzt gezogenen Folgerungen und Prüfungen ergeben haben, spielen die oberflächlichen Elektronen der chemischen Atome (Starks Valenzelektronen) in ihrer Verbindung zu chemischen Molekülen die beherrschende Rolle . . . Die Atome eines gasförmigen Elements können demnach folgende Gleichgewichtszustände annehmen: neutrales unverbundenes Atom, einwertiges positives Atomion, unter Umständen mehrwertiges Atomion, . . . neutrales mehratomiges Molekül und positives mehratomiges Molekülion . . . jeder Gleichgewichtszustand desselben Elements mit scharfen, charakteristischen Frequenzen . . ."

Von den sichergestellten Tatsachen dieses Gebietes sind hervorzuheben: nicht nur die Spektren verwandter Elemente mit demselben elektrischen Ladungszustand sind, obzwar das

*) S. Hirzel, Leipzig.

**) Jahrb. der Radioaktivität und Elektronik. 14. Bd. 2. Heft. p. 139. Hirzel, Leipzig 1917.

***) p. 153.

Spektrum eine der charakteristischesten und individualistischesten Besonderheiten jedes Elementes ist, mit einander durch mathematische Progressivformeln verknüpft, ein und dasselbe Element schwingt in verschiedenen Ladungszuständen grundverschieden, sondern es zeigt sich, daß beispielsweise das Sauerstoffatom, das wir als das elektronegativste Element zu betrachten gewohnt sind, sich unter positiver Aufladung als positives Atomion (Kanalstrahl) von der Anode in diametral entgegengesetzter Richtung bewegt, wie es vom Sauerstoff erwartet werden könnte. Auch im Gas und im Vakuum wiederholt sich also, was wir schon bei der Voltazelle und beim Elektro-Akkumulator hervorgehoben haben: das elektrische Potentialgefälle ist für die Bewegungsrichtung der Atome innerhalb und außerhalb des Moleküls richtunggebender als seine chemische Natur.

In einer lebenden Zelle also, in der es nach allem, was wir wissen und was wir mit hoher Wahrscheinlichkeit vermuten können, kein Plätzchen gibt, in dem nicht elektrostatische Felder, bei Strömen kontinuierlicher Natur wie in Niere und Verdauungskanal auch elektromagnetische Felder beherrschend die Bewegungen der Atome und Atomgruppen dirigieren, ist die Verteilung der Elektrizität das primärste und wichtigste Prinzip.

Die große Tatsachenwelt, die die Elektronenforschung in verdünnten Gasen erschlossen hat, bezieht sich natürlich nicht etwa auf die verdünnten Gase allein; man kann sie aber nur im Vakuum isolieren und beobachten. Aber es ist nicht zu bezweifeln, daß alle Atome, Elektronen und Moleküle unter dem normalen Luftdruck und in der Körperflüssigkeit von denselben Energien dieselben Bewegungsimpulse erhalten, die naturgemäß in dichteren Medien infolge der unzähligen sehr nahen Widerstände nach molekularen und nach noch kleineren Weglängen aufgehalten und zurückgestoßen werden. Wenn ultraviolette und Lichtstrahlen aus reflektierenden Metallflächen Elektronen emittieren, wenn diese im Vakuum keinen Widerstand finden, so müssen wir die analogen Strahlwirkungen auch unter Atmosphärendruck dort vermuten, wo wir sie nicht messend und wägend fassen können.

Zu den überzeugenden physikalischen Gründen, die uns in den lebenden Geweben ultramikroskopische Elektronenstrahlen, vielleicht auch Kanalstrahlen vermuten lassen, kommt hinzu, daß

zahlreiche Forscher derartige Strahlungen in lebenden Geweben, sogar in toten und in Asche experimentell gefunden haben.

DIE NICHTMECHANISCHE KOMPONENTE DES KREISLAUFES.

Für jemanden, der von der Idee ausgeht, daß die Zellen der Organismen primär mit elektrischen Ladungen behaftet sind und daß das chemische Geschehen vielleicht nur die Folge der elektrischen Spannungen und Ströme darstellt, für den erscheint, wie schon öfter hervorgehoben, Vieles, was in den Rahmen der rein chemischen Darstellung absolut nicht hineinpassen will, nicht mehr so ganz unbegreiflich, andererseits aber ist es natürlich, daß der eine einzige neue Gedanke keineswegs ausreicht, um alles Unerklärte zu erklären und alles Dunkel zu erleuchten, um so mehr, als drei Generationen von Naturforschern, die sich bemüht haben, das experimentelle Tatsachenmaterial zu sammeln, hiebei fast allein von morphologischen, chemischen, fast niemals aber von elektrischen Gesichtspunkten ausgegangen sind.

Aber auch ohne eine besondere experimentelle Begründung ist es für den mit dem Inhalt der heutigen Physik Vertrauten eine tote Gewißheit, daß die Erythrozyten, die roten Blutkörperchen, elektrisch geladen sind. Die im Verhältnis zum Körperinhalt ganz kolossale Oberflächen-Entwicklung, die Änderung des physikalisch-chemischen Verhaltens, nachdem sie den lebenden Körper verlassen haben, die Tatsache, daß sie für negative Ionen nach innen zu durchlässig sind, für positive aber nicht, ihre Bewegung im Inneren der Kapillaren (während die Leukozyten auf dem Rand der Kapillaren rollen, was man gewöhnlich mechanistisch-hydrostatisch erklären möchte), alles dies und vieles Andere stempeln die roten Blutkörperchen zu kleinen Kondensatoren statischer Elektrizität, die wahrscheinlich in einer Innenzone, wie sie durch Unnas RW-Färbung*) ausgefärbt wird, eine positive Ladung tragen, also wie kleine Anoden wirken. Unna hat ferner eine ganz schmale Randzone als „Sauerstofffort" bei Hühnerblut ausgefärbt.

Bei Unnas Bild, das uns eine typische Kugelschalen-Kon-

*) P. G. Unna, Arch. für mikrosk. Anatomie. Bd. 87. Abt. I. 1915. p. 145. Tafel XII. (Die Sammelstofforte und Reduktionsorte.)



densator-Konstruktion vorführt, ist nicht angegeben, ob das Blut Arterien- oder Venenblut, ob es ganz frisch oder halb abgestorben gefärbt wurde. Sowohl auf dem Oxydationsbild mit Leukomethylenblau (R. W.), das sich durch Sauerstofforte bläut, als auf dem Reduktionsbild (Permanganat) erscheinen drei, oder eigentlich vier Kugelflächen mit differenten Ladungen ineinander gesteckt. Es ist durchaus nicht ausgeschlossen, daß die roten Blutkörperchen sich gegen vorstehende Färbungen verschieden halten. Wie immer man sich den Mechanismus der Elektrizitätsladungen vorstellt, nach den sicher feststehenden physikalisch-chemischen Gesetzen muß eine starke Änderung in dem Ladungs-



Fig. 8. RW.



Fig. 9. Manganbild.

zustand der Blutkörperchen eintreten, indem in der Lunge Sauerstoff und in den Kapillaren Kohlensäure von ihnen aufgenommen wird, wobei zugleich andere Anionen die Oberfläche der Körperchen passieren. Diese starke Ladungsänderung ist sicher, es ist nur nicht klar, ob sie Folge oder Ursache des Sauerstoff-Kohlensäure-Austausches ist.

Das vorstehende Bild Unnas sieht so aus, als ob das Permanganat einen anderen Ladungszustand fixiert oder erzeugt hätte als das Rongalit-Weiß. Das Negativ stimmt nicht genau mit dem Positivbild.

Der Gedanke, daß die roten Blutkörperchen, namentlich dann, wenn sie in der Lunge mit Sauerstoff aufgeladen sind, dem normalen Körpergewebe gegenüber trotz ihrer Ladung mit dem elektronegativsten Element sich als Anoden (als positive Pole) verhalten sollen, erscheint auf den ersten Blick schwer zu verstehen. Aber nur auf den ersten Blick. Bei reiflicherem Nach-

denken wird es klar, daß es ursprünglich nur Anoden sein können, die aus der eingeatmeten Luft den Sauerstoff auf sich verdichten, die aus den Geweben die Kohlensäure an sich ziehen. Die Idee der einfachen Diffusion in den Lungenalveolen erscheint äußerst unwahrscheinlich. Das ist eben der Grundgedanke der elektrochemischen Stoffumsetzung, daß bei dieser Art von Chemismus, den ich einen *gerichteten* Chemismus nenne, im Gegensatz zum *diffusen* Chemismus der Technik und des anorganischen Laboratoriums, daß die gewöhnlichen Gesetze und molekularen Anziehungskräfte ihre Richtungen dabei vertauscht zu haben scheinen. Bei jenen chemischen Stoffen, die wir jeden Augenblick analytisch abwägen können, werden die Membranen und Körperzellen immer und überall *entgegen* den Gesetzen der Diffusion passiert, es ist geradezu das Kennzeichen und Unterscheidungsmerkmal der lebenden Zelle, daß sie nicht leblos diffundiert, sondern wählen kann. Aus diesem Grunde ist es unwahrscheinlich, daß gerade der komplizierte Bau der Lunge dazu dienen soll, ein inaktives Gasfilter zu bilden.

Nur elektrisch ist das chemische Wunder erklärlich, daß unter den Dutzenden von Reduktionsstoffen, Zuckern, Fetten, Eiweißen, die das Blut in die Lungenzellen schafft, ausgerechnet der sauerstoffreichste Bestandteil, das Kohlensäure-Hämoglobin den Luftsauerstoff an sich zieht. Für den Elektrochemiker ist diese scheinbare Paradoxie nicht störend. Das alte Beispiel der Volta-Zelle wird dies verdeutlichen. Wenn wir im nicht elektrochemischen Laboratorium Kupfer mit verdünnter Schwefelsäure zusammenbringen, so wissen wir, daß das Kupfer von der Säure angegriffen wird und in Lösung geht, auch wenn sich bereits Kupfersulfat in der Lösung befindet. Wenn man aber neben die Kupferplatte eine Zinkplatte stellt, diese außerhalb der Flüssigkeit leitend verbindet, so wissen wir, daß das Kupfer nicht nur nicht mehr in Lösung geht, sondern daß es noch aus der Lösung an die Kupferplatte niedergeschlagen wird, während das Zink in Lösung geht. Wir wissen heute, daß *alles* chemische Geschehen auf elektrische Ursachen zurückgeht, wir haben gelernt, die Elektronen-Schwingungen zu studieren, die in der gewöhnlichen, scheinbar unelektrischen leuchtenden Flamme beim Uebergang der Sauerstoff-Elektronen im Spektrum erscheinen, wir wissen, daß jede Ausfällung, Lösung, jede chemische Verbindung

und Trennung in den Atomen mit Elektrizitätsbewegungen ursächlich verknüpft ist; der hier vorgetragene Gedanke hat nicht zum Inhalte, daß jede chemische Reaktion im Molekül und im Atom auf elektrische Ionen- und Elektronen-Reaktionen zurückgeht, sondern es liegt der Nachdruck darauf, daß die Organismen mit jenem Agens als dirigierender Kraft arbeiten, die im alten Sprachgebrauch als elektrochemische und elektrostatische Kräfte bezeichnet werden, daß also Millionen und Billionen von Atomgruppen durch nicht in ihnen liegende, sondern ihnen von außen aufgezwungene elektrische Richtkräfte geleitet werden. Diese Darlegungen haben also sehr wenig damit zu tun, was man als moderne physikalisch-chemische Theorien bezeichnet und sie würden ebenso oder fast ebenso Geltung verlangen, wenn die ganze Erscheinungswelt der Ionen und Elektronen bis jetzt unentdeckt geblieben wäre.

Es springt in die Augen, daß die Bewegung der Körperflüssigkeit etwas Ur-Organisches ist, etwas, was wir in der niedersten Pflanzenzelle als Protoplasma-Bewegung wiederfinden und was mit mechanischen Kräften keineswegs erklärt werden kann (sicher auch nicht mit der bloßen Hinzufügung elektrostatischer Bewegungen.) Fürs erste ist es aber doch von Vorteil, wenn man die größten mechanischen Oberflächlichkeiten beiseite setzt und, indem man sich an die niederen Tiere erinnert, die eine Zirkulation ohne Herz haben, sich damit bescheidet, daß das Herz, das hochspezialisierte Pumporgan der höheren Tiere, eben nur die höchste Spezialisierung und Beschleunigung der Zirkulation bewirkt, aber doch nur eine bereits bestehende Tendenz verstärkt und vertieft. Der Lymphstrom in den Lymphgefäßen, der Blutstrom in den vom Herzen entfernten dünneren Venen und in der Pfortader, die Zirkulation der niederen Tiere ohne Herzen ist von einer anderen Kraft bewegt als vom einfachen hydrostatischen Druck. Vielleicht wirken dabei elektrische Kräfte mit.

Anzeichen dafür sind die Bewegung der roten Blutkörperchen in den Blutlymphdrüsen und in der Milz. In diesen Drüsen werden die Erythrozyten an einem Gewebe vorübergeführt, das nach den gegenwärtig herrschenden histologischen Meinungen keine geschlossenen Blutkapillaren mehr besitzt, sondern netzartige Maschen, zwischen denen einzelne rote Blutkörperchen

in das Lymphdrüsengewebe übertreten und dort zerstört werden. Es erscheint mir möglich, daß bei diesem Anlasse eine elektrostatische Ausmusterung nicht mehr normal anodisch geladener Blutkörperchen stattfindet. Einerseits ist es wahrscheinlich, daß ein protoplasmatisches Kolloidgewebe ohne Regenerationsmöglichkeit ziemlich rasch altert und dabei seine normale Ladung gegenüber dem Serum vermindert oder einbüßt, andererseits wäre es schwer zu verstehen, weshalb einige der roten Blutkörperchen, die sonst immer die Mitte der Kapillaren einnehmen, an die Wand gelangen und sogar durch sie hindurchtreten können. Das ist jedoch, wie gesagt, nur eine der Möglichkeiten, die sich ergeben, wenn man das rote Blutkörperchen als einen Kondensator auffaßt, der nach einem gewissen Zeitablauf wie alles Lebende degeneriert.

Nach diesen Beispiel wäre es mit den uns bekannten physikalischen Kräften möglich, ein abnormales rotes Blutkörperchen aus dem Strom augenblicklich herauszufinden und ihm zugleich einen Bewegungsimpuls zu geben, der ihn aus dem Strome der normalen Erythrozyten herausholt.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß das rote Blutkörperchen sich elektrisch in einem polaren Gegensatz befindet zu dem normalen Ernährungsgewebe, von dem wir aus der Uebereinstimmung der Färbungen mit den elektrophysiologischen Bestimmungen durch Galvanometer und Kapillar-Elektrometer wissen, daß es regulär negativ geladen, also kathodisch ist. Die grobsinnliche Vorstellung des Sauerstofftransportes durch das Oxyhämoglobin in die reduzierenden Gewebe ist zumindest dahin zu korrigieren, daß in der assimilatorischen Phase des Erythrozyten, also wenn er mit Sauerstoff von der Lunge kommt, eine anodische Polarisation des roten Blutkörperchens vorhanden ist. Was aber in der zweiten Phase geschieht, während sich das rote Blutkörperchen in dem Gewebe mit Kohlensäure belädt, das ist äußerst schwierig zu verstehen. Wohl begreift man, daß eine Anode das Kohlensäure-Anion an sich zieht, aber indem sie dies tut, verliert sie ihre positive Polarität, oder vermindert sie so stark, daß man schwer verstehen kann, weshalb jetzt nicht die zahlreichen elektropositiven Blut-Kationen, also Natriumkationen, Ammonium etc. osmotisch in die roten Blutzellen eindringen. Wenn wir außerhalb des Körpers den Funken einer Leidener Flasche in Blut schlagen

lassen, so wissen wir, daß das Blut sofort hämolytisch wird. Besitzt die lebende Zelle Regulationsmechanismen, die die Entladung nur bis zu einem vorherbestimmten Punkte gestatten, der das osmotische Gleichgewicht zwischen Blutzelle und Blutplasma ganz unverändert läßt? Ein solches Gleichgewicht, das durch die Angliederung und Abgliederung des stark elektronegativen Sauerstoffs nahezu unberührt bleibt, ist physikalisch unvorstellbar.

Dabei aber ist der Erythrozyt, das normal kernlose und strukturlose rote Blutkörperchen noch ein Muster von Einfachheit gegenüber dem Leukozyten, dem weißen Blutkörperchen. Abgesehen von dessen höchst komplizierter Struktur mit Kern, Zentriolen, Chromosomen, Granula, oft mit mehreren Kernen, Kernmembranen etc., scheint es, wie Ehrlich zuerst beschrieben hat, verschiedene Arten von Leukozyten zu geben, die verschiedenen Aufgaben dienen. Die bisher vorliegenden Lebendfärbungen, die unter den Leukozyten besondere, diametral sich färbende Sorten herausgehoben haben, übrigens auch Unnas Bilder, die diametrale Färbungen von Kern und Plasma aufweisen, lassen erkennen, daß unter dem Sammelnamen Leukozyt eine Vielheit verstanden wird, die u. a. auch in elektrischer Beziehung entgegengesetzte Polaritäten aufweist.

Die genaue von Ehrlich begründete färberische Unterscheidung der weißen oder richtiger: farblosen Blut- und Lymphkörperchen hat je nach der Verwandtschaft der Zellen zu basischen oder sauren Farbstoffen zuerst drei Hauptsorten ergeben: basophile, azidophile (auch eosinophile genannt) und neutrophile Leukozyten. Die neueren Untersucher finden es nicht richtig, die Gruppierung ausschließlich nach dem Verhalten gegenüber den Teerfarben zu schematisieren und finden, daß die Einordnung nach dem Gesamthabitus der Zellen, nach ihrer autogenetischen und phylogenetischen Entwicklung zu erfolgen habe. In seiner Monographie über „Blutkörperchen und Wanderzellen" von Weidenreich*) begründet dieser genaueste Kenner des Spezialgebietes seine Forderung, die Färbung als ein äußerliches Merkmal mehr zufälligen Charakters zu behandeln und die Unterscheidung auf Kerngestalt, Abstammung und physiologisches Verhalten zu basieren. Diese Frage entscheidet sich voraussicht-

*) Franz Weidenreich. (Heft 15 der Sammlung anat. und physiol. Vorträge, Jena, Fischer, 1911).

lich dahin, ob die Granula, die sich färben, lebenswichtige Fundamental-Organellen des Plasmas sind, oder Reservedepots, halb verdaute phagozytäre Einschlüsse, Sekrete, Exkrete oder andere zufällige Begleitobjekte der Zellen.

Wer auf dem Standpunkt der Altmannschen Protoplasma-Theorie steht, daß die Granula Träger des Zellebens sind, muß die konträre Färbung mit sauren oder basischen Teerfarben (also ihre elektropositive oder -negative Natur) als etwas Lebenswichtiges ansehen, wer die Granula oder bestimmte Arten von ihnen für zum Ausstoßen bestimmte Zellteile ansieht, muß nach wichtigeren Unterscheidungsmerkmalen suchen. In einer gewissen Beziehung haben neuere Experimente gezeigt, daß die vitale Färbung der Leukozyten und der ihnen verwandten Wanderzellen („Pyrrolzellen" von Goldmann, Klasmatozyten, Makrophagen, ebenso wie Kupffersche Sternzellen der Leber, Fibroblasten) mit Zinnober, mit Lithionkarmin, Neutralrot, Pyrrol, Trypanblau merkwürdigerweise die Granula gerade dieser Zellen mitten aus den ungefärbten Geweben herausgreift, daß also ihre elektrische Polarität anscheinend nicht nur stärker ist, als das Protoplasma der eigenen Zelle, sondern sich von den zahlreichen sonstigen Zellen ganz scharf abhebt.*)

Ganz parallel damit heben sich in Unnas Arbeiten mit Gefrierschnitten von frischen Geweben die Wanderzellen ziemlich scharf von den übrigen ab, ebenso die Lymphozyten und Leukozyten. Nach allen diesen zahlreichen Beobachtungen, die schon Schulemann, einem sonst der Elektrostatik fernstehenden Autor, die Beobachtung aufgezwungen haben, es sehe fast so aus, als ob die Tusche-Emulsionen und Farbstoffe elektrisch (kataphoretisch) niedergeschlagen werden würden, scheint es, als ob diese mitten in höheren Organismen freibeweglich lebenden Zellen starke elektrische Ladungen mit sich führen würden, deren Ursache und deren Mechanismus allerdings noch ganz dunkel sind.

Die große Zahl der vorliegenden Beobachtungen gestatten nur den ganz allgemeinen Rückschluß, daß die Leukozyten, Lymphozyten und Wanderzellen, zumindest die sich stark basophil verhaltenden, möglicherweise aber auch jene mit azidophilen

*) Die vitale Karminspeichung. Von K. Kiyone. Jena, Fischer, 1914. Die äußere und innere Sekretion im Lichte der „vitalen Färbung" von Edw. E. Goldmann, Tübingen. Laupp 1909.

oder amphoteren Einschlüssen, sich dem Hauptorganismus gegenüber als Kathoden verhalten, während die roten Blutkörperchen in ihrer arteriellen Epoche höchstwahrscheinlich Anoden sind, zumindest dem Blutplasma gegenüber.

Nach dem gegenwärtigen Stande der Elektrizitätslehre müßte man eigentlich, wie bereits hervorgehoben, die Kathoden, welche die Träger der Elektrizität, die Elektronen, ausstrahlen, theoretisch als die richtigen positiven Pole bezeichnen, die Anoden aber als etwas Relatives, nämlich als etwas Weniger-Positives. Ebenso ergibt die Durchmusterung der chemischen Physiologie vom elektrischen Gesichtspunkte aus, daß wahrscheinlich alle lebenden Zellen reguläre Kathoden sind, daß ihre kathodische Polarität das Hauptkennzeichen ihres Lebens ist und daß nur wenige Ausnahmszellen, Belegzellen des Magens der Wirbeltiere, Glomerulus der Niere, rote Blutkörperchen sich relativ als Anoden verhalten, also als weniger elektrisch geladene Punkte. Aus historischen Gründen nennt man dieses Weniger an elektrischer Ladung, das eigentlich negative Ladung heißen sollte, von altersher positive Elektrizität.

Wie es immer mit neuen Gedanken geht, so werfen sie auf bisher unerklärte Fragen ein ganz neues Licht, schaffen aber neue Probleme, die noch unlösbarer scheinen als die alten. Für den, der sich mit den Tatsachen der Elektrochemie und der Elektronik befaßt hat, macht es z. B. keine Schwierigkeit, eine der rätselhaftesten und unerklärlichsten Erscheinungen zu erläutern, die allen bisherigen Versuchen gegenüber unverständlich geblieben ist, nämlich den Transport des von den roten Blutkörperchen herangeschafften Sauerstoffs aus dem Lumen der Kapillaren in die Gewebe, in denen es, wie alle Experimente übereinstimmend ergeben hatten, erst verbraucht wird. Man sprach gern von „Diffusion“ des Sauerstoffs, von einem Gefälle von verschiedenen Partiärdrucken. Diese Erklärungsversuche sind natürlich ganz unmöglich. Abgesehen von allen anderen Einwänden passieren die Erythrozyten die Kapillaren viel zu rasch, als daß eine bloße Diffusion ihren Sauerstoff in erheblicher Menge absaugen könnte. Wahrscheinlich auch, zumindest nach der herrschenden Ansicht von der ausschließlichen Blutbewegung durch Herzdruck ist der Druck in den Kapillaren höher als im Gewebe. Und trotzdem die nach bestimmten Sauerstoff-Verbrauchsorten gerichtete rasche Ablagerung des Sauerstoffs.

Das kann nicht anders bewirkt werden als durch eine elektrische Entladung, eine Kolloid-Umladung oder einen anderen von außen auf den roten Blutkörperchen als Fernwirkung auftretenden elektrischen Vorgang. Dies einmal als Fundamental-Tatsache zugegeben (daß eine Sauerstoff-Ablieferung ohne zumindest eine akzidentelle Elektrizitäts-Bewegung undenkbar ist, versteht sich von selbst) also die Elektrizitäts-Bewegung als Hauptursache einmal zugegeben, so folgt daraus zwangläufig, daß die O-Moleküle in die Gewebe gleichsam mit Blitzgeschwindigkeit hineintelegraphiert werden können.

Man kann nämlich elektrochemisch Moleküle über große Entfernungen sehr rasch transportieren, wenn man auf die individuelle Identität der Moleküle verzichtet. Nach einem geläufigen Bilde hat man zum Beispiel ein Kabel zwischen New York und Emden und läßt die Rückleitung durch das Meerwasser gehen. In derselben Sekunde, in der ein positiver Stromstoß von New York durch den Draht läuft, wird in der Rückleitung in Emden ein Kation z. B. ein Natriumion, wenn es an der Endplatte metallisch anwesend wäre, in Lösung gehen und in New York ein anderes Natriumion an der andern Platte ausgeschieden werden, das sich naturgemäß mit Meerwasser sofort in Natronlauge umsetzen würde. Es ist gleichsam durch den Elektrolyten hindurchtelegraphiert worden.

Man hat sich vorzustellen, daß in den Säften der Organismen mit ihrer ziemlich großen Ähnlichkeit der chemischen Zusammensetzung durch elektrische Potentialausgleiche jeden Augenblick Atome, Ionen und Ionengruppen an bestimmte Punkte geworfen werden. Für viele physiologische Tätigkeiten des Körpers scheint es nicht darauf anzukommen, daß gerade bestimmte Atomgruppen auf bestimmten Punkten ankommen, es genügt für bestimmte Etappen der Verdauung und Resorption beispielsweise, daß eine bestimmte Basizität oder Azidität vorhanden ist. Diese Bezeichnungen haben jedoch eine in Ziffern faßbare Bedeutung nur durch die elektrischen Ladungszustände der betreffenden Stoffe. Auf den Stoff selbst und seinen Prozentgehalt an bestimmten chemischen Substanzen kommt es manchmal gar nicht an.

An einem andern Beispiel ausgedrückt, würde sich bei dem vorliegenden Falle der Sauerstoffatmung der Gewebe etwa

Folgendes vorstellen lassen: das rote Blutkörperchen ist mit seinem Oxyhämoglin in der Kapillare angelangt und hat die Aufgabe, seinen lose gebundenen Sauerstoff den Geweben abzugeben. Ist es nun richtig, daß das Blutkörperchen durch irgendeine statische oder galvanische Ursache, durch Reibung, Influenz oder durch chemische Vorgänge eine erhebliche elektropositive Ladung hat und in den Geweben ein elektronegativer Gegenpol existiert, der sich in diesem Augenblick entlädt, so ist es nicht einmal nötig, das Sauerstoffion elektrolytisch in das Gewebe abwandern zu lassen, sondern es wird chemisch derselbe Effekt erzielt, wenn etwa Wasserstoffkationen sich in der Richtung Gewebe-Erythrozyt entladen und Sauerstoffionen sich im Gewebe ausscheiden. Der Wasserstoff, der sich am Blutkörperchen ausscheidet und im Augenblick der Entstehung mit dem Sauerstoffatom des Oxyhämoglobins verbindet, bringt genau denselben chemischen Effekt hervor, als ob der Sauerstoff von dem Erythrozyten ins Gewebe abtransportiert worden wäre. Der Sauerstoff des arteriellen Blutes verschwindet als Wasser und taucht im Gewebe wieder auf, um dort Oxydationen vorzunehmen, so etwa wie im Beispiel des Kabels das Natrium nicht als Metall in New York abgeschieden wird.

Wiederholt sei hervorgehoben, daß das alles nur ganz beiläufig und beispielmäßig erwähnt wird. Statt des Wasserstoffes kann Kalium oder Natrium aus dem Blute mit demselben Endeffekt am Oxyhämoglobin erscheinen, statt des Sauerstoffes Chlor oder ein Säure-Rest im Gewebe. Worauf es ankommt und was schließlich in gewissen Fällen denselben chemischen Endeffekt erzeugt, ist nicht ein chemisches Element oder eine Atomgruppe, sondern ihr elektrochemischer Ladungssinn, ihre Positivität oder Negativität. Ein Element oder eine Atomgruppe kann gewisse andere Atome oder verwandte Atomgruppen derselben Elektro-Polarität dabei vertreten.

Naturgemäß habe ich mit meinem im Pflanzenteil angegebenen Berlinerblau-Verfahren auch Blut untersucht, u. zw. Menschenblut und Froschblut. Im allgemeinen ist das Verfahren zu grob für ein so feines Substrat, außerdem bringen die Schwermetallsalze das Blut sofort zum Gerinnen. Es schien mir aber doch, daß sowohl rote wie weiße Blutkörperchen in jenem

Zustande, in dem man sie auf dem Objektträger erhält, überwiegend kathodisch sind.

Hübsche Bilder erhält man mit Eiter, der zwar ebenfalls sofort gerinnt, aber die Gerinnungsmasse bleibt stark kathodisch, sie wird mit der kathodischen Lösung blau und stößt energisch das anodische Blau ab, so daß sich auf dem Anodenpräparat die zusammengebackene Masse scharf von dem umgebenden Blau abhebt.

DIE REDUKTIONSKRÄFTE DER TIERISCHEN ZELLE.

Im Zusammenhang mit den Betrachtungen über den Oxydationsmechanismus in den Kapillaren und Geweben muß etwas besprochen werden, was in der biochemischen Literatur der letzten Jahrzehnte nicht genügend beachtet wird, nämlich die starken Reduktionskräfte der tierischen Zelle. Im allgemeinen steht die Biochemie unter dem Leitgedanken, daß die Pflanzenzelle Kohlensäure und Wasser zersetzt und reduziert und daß die Tierzelle die Kohlenstoff- und Wasserstoff-Verbindungen wieder oxydiert. Von der Pflanze ist es schon sehr bald bekannt geworden, daß sie — insbesondere in der Dunkelheit — Sauerstoff verbraucht und Kohlensäure und Wasser ausatmet, bei der Tierzelle hat man wohl auch Reduzierungen beobachtet, aber sie bisher in ihrer allgemeinen und grundlegenden Bedeutung sicher unterschätzt.

Jede tierische Zelle verfügt über starke reduzierende Kräfte. Damit ist nicht darauf angespielt, daß die Zellen Permangamat und andere hochoxydierende Stoffe reduzieren, daß sie Methylenblau und andere Teerfarbstoffe oder Indigo zu den farblosen Leukoverbindungen reduzieren, daß sie basophile Kerne haben, u. a. m., sondern es scheint ein Fundamentalgesetz auch der tierischen Zelle zu sein, daß sie kathodische (elektronegative) Punkte enthält, indem sie während des Lebens normaler Weise Zersetzungsspannungen von vielleicht 2 Volt betätigt. (Die Zersetzungsspannung angesäuerten Wassers bei Atmosphärendruck ist zirka 1,7 Volt). Freilich hat man bisher in Muskel- und Nervenzellen höchstens 0,1 Volt messen können und nur bei elektrischen Fischen 50 und 60 Volt, aber da wir mikroskopische Elektroden für die einzelnen Zellelemente noch nicht besitzen,

so können wir nur Misch-Zuleitungen aus hunderten nicht parallel geschalteten Zellen auf einmal anlegen, wobei wir nur Nebenschlußbögen erhalten, während auf den Schnittflächen die Hauptspannungen über die feuchte Oberflächenschicht durch eine Art von Kurzschluß sich ausgleichen können. Mit dem statischen Elektrometer erhält man durchaus Spannungen der Größenordnung von über 2 Volt, wie sie die chemischen Zerlegungen der Zelle fordern müssen, nur konnten diese Messungen wegen der hohen Empfindlichkeit des Quadrantenelektrometers bisher noch nicht in regulären Gesetzmäßigkeiten festgelegt werden.

Von den normalen Reduktionen der tierischen Zellen seien nur folgende erwähnt: Eine der häufigsten Reduktionen während des Stoffwechsels ist die Umwandlung von Zucker in Fett, die nicht nur den Tierzellen, sondern ebenso den Hefezellen und Bakterien eigen zu sein scheint. Wie immer man sich diese Reaktion in ihrem Einzelmechanismus elektrochemisch konstruiert, mit weniger als 2 bis 3 Volt wird man diese Reduktion nicht durchführen können. Eine andere normale Reduktionsarbeit ist bei den Wirbeltieren die Umwandlung aufgenommener niederer Fettsäuren in die arteigenen höheren Fettsäuren, Stearinsäure, Palmitinsäure u. s. w. Zu dieser Reaktion, die mit Anlagerung von Wasserstoffatomen durchgeführt wird (was man in der Fett-Industrie mit „Härten der Fette" bezeichnet und was man auch elektrochemisch mit Kathoden-Wasserstoff vornehmen kann), wird man wohl auch schwerlich ohne eine bedeutende elektromotorische Kraft auskommen können. Die technischen Spannungen der Fetthärtungs-Patente sind alle erheblich.

Eine starke Spannung erfordert auch das Konzentrieren des Kaliums mitten heraus aus neutralen, sauren und alkalischen Säften an bestimmten Punkten gewisser Zellen. Die Orte im Körper, an denen sich Kalium im normalen Leben kondensiert, müssen die elektronegativsten Orte des Körpers sein. Ich habe schon vor zwanzig Jahren in meinen ersten Betrachtungen die Pankreaszellen, dem Verdauungskanal gegenüber als negative Pole bezeichnet. Tatsächlich hat A. B. Macallum*) die Kaliumkondensation dort gefunden, wo ich die kathodischen Punkte

*) Oberflächenspannung und Lebenserscheinungen (Ergebnisse der Physiologie. 1. Jahrg. p. 602. Wiesbaden 1911).

vorausgesagt hatte, im Azinus des Pankreas am Lumenrand der Zellen, ebenso in den gewundenen Nierenkanälchen, auf der Oberfläche des Achsenzylinders der Nervenfaser, u. s. w.

Nach der Art der Färbung und nach den Ergebnissen der biochemischen Experimentalforschung läßt sich annehmen, daß die Reduktionskraft der höheren Wirbeltiere, die naturgemäß als Grundeigenschaft allen lebenden Zellen zukommt, in den Resorptionszellen der Darmschleimhaut, in den gewundenen Kanälchen der Niere, im Azinus des Pankreas, in den basophilen Zellen der Haut, wahrscheinlich auch in gewissen Elementen der Lymphdrüsen konzentriert sind, vielleicht auch in einzelnen Elementen der Lunge.

Darauf deuten nicht nur die seit Ehrlich fortgesetzten Versuche über die Reduktion von Farbstoffen im normalen, lebenden Gewebe, darauf deuten auch wichtige physikalische und energetische Fingerzeige. Immer, wenn man die Energiebilanz einzelner Organe mit dem Verbrauch von Sauerstoff und der Produktion von Kohlensäure kalorisch verglich, kam man auf ein krasses Mißverhältnis von Energieverbrauch und erzieltem Effekt. Bei einem der am stärksten atmenden Gewebe, bei der Niere, hat man gefunden, daß sie kaum ein Prozent ihres Kalorien-Verbrauches in der geleisteten Konzentrationsarbeit erkennen läßt. Und dabei ist diese Rechnung gewöhnlich unrichtig. Man vergißt nämlich, daß die Niere außer der erscheinenden Kohlensäure noch andere Oxydationsprodukte in flüssiger Form als Harnsalze ausscheidet, die im Blute in weniger oxydierten Formen zirkulieren, z. B. Phenylschwefelsäure, Karbonate, Sulfate u. s. w., und daß auch aus dieser Quelle eine große Kalorienzahl der Nieren-Energie-Bilanz zufließt, die ebenfalls spurlos mit den 99% des bisher berechneten Defizits verschwindet. Man kann diese kolossalen Energieverluste nur dem Umstande zuschreiben, daß das Nierengewebe, vor allem die kathodischen Zentren des Lumenrandes der gewundenen Kanälchen die Reduktionsarbeit, die es an den eingeführten Farbstoffen betätigt,*) auch im normalen Leben als eine seiner Haupt-

*) Zur Morphologie der Nierensekretion. Von T. Suzuki. Jena, Fischer, 1912. — Die vitale Karminspeichung. Von K. Kiyono. Jena, Fischer, 1914. Die äußere und innere Sekretion. Von E. E. Goldmann, Tübingen, Laupp, 1909. In allen diesen Monographien Literatur-Übersichten des Spezialgebietes.



aufgaben vorzunehmen hat. Was hier und im Azinus des Pankreas an Reduktionen geschieht, ob aus Blutzucker Fett gebildet wird, ob niedere Fettsäuren zu höheren reduziert werden, ob Wasserstoffatome an die Erythrozyten angelagert werden, lauter Dinge, die mit unseren chemischen Methoden schwer nachzuprüfen sind, das läßt sich nicht einmal vermutungsweise sagen. Auf die Individualität der Reduktions-Arbeit kommt es im gegenwärtigen Augenblick nicht an, sicher scheint nur, daß eine erhebliche, mit großem Energieverbrauch einher gehende Reduzierung stattfindet, mit der Hauptrichtung, daß die das Gewebe verlassenden Säfte stark mit Produkten der kathodischen Zersetzung beladen sein müssen.

Irgendetwas von einem veränderten Chemismus derartiger Organe ist schon lange von den Experimentatoren der „inneren Sekretion" beobachtet worden. In Biedls Handbuch der „inneren Sekretion" wird sowohl dem Pankreas als der Niere, wohl auch der Leber ein richtiges inneres Sekret zugeschrieben. Meines Erachtens nach existieren einige dieser Sekrete entweder direkt als reduzierte Verbindungen, die dann anderen Zellen ihre Kalorien abliefern müssen, oder vielleicht zugleich in negativer Form dadurch, daß Stoffe, die in anwachsender Menge den Organismus schädigen würden, z. B. Blutzucker, durch Reduktion zu Fetten oder zu Fettsäuren gleichsam entgiftet werden. Die Anhäufung von Fett aus Zucker in Niere und Leber, die große Bedeutung von Pankreas, Leber und Niere für den Zuckerstoffwechsel würde dafür sprechen, daß diese stark reduzierenden Organe den Nahrungszucker nicht nur in Glykogen umwandeln, sondern auch in Fett und dadurch den Kreislauf gegen eine Zuckerüberschwemmung während der Resorption schützen.

Man wird der Reduktionskraft der Organe am ehesten experimentell beikommen, wenn man ungiftige Schwermetalle mit ihnen von verschiedenen Zuführungsbahnen aus zusammenbringt, rasch gefrieren läßt und in den Schnitten den Weg der Kationen stufenweise verfolgt.

DIE ARTEIGENE LADUNG ALS SCHUTZ.

Die Idee, daß die Körperzellen im normalen Leben ihre arteigenen Ladungen haben, läßt sich naturgemäß auch biologisch auswerten. Wir wissen heute aus den geläufigsten Tatsachen der

Kolloidchemie, daß es mit Leichtigkeit gelingt, amphotere (zwischen Säure- und Basencharakter schwankende) Kolloide elektrisch zu laden und wieder entgegengesetzt elektrisch umzuladen, worauf sie gegen jene chemische Stoffe, mit denen sie vorher reagiert haben, unempfindlich werden. Das geläufigste Beispiel aus der Chemie der nicht kolloiden Stoffe ist die öfter erwähnte Voltazelle, wobei das Kupfer, das sonst normal von Säuren angegriffen wird, durch den Strom eine gewissermaßen kathodische Schutzladung erhält und statt von der Säure aufgelöst zu werden, Kupfer aus der Lösung ansaugt und auf sich abscheidet.

Das, was der elektrostatischen Betrachtungsweise als Grundsatz der physiologischen Reaktion vorschwebt, daß die elektrische Ladung ein wichtigerer Faktor des Chemismus ist, als die spezielle chemische Natur, daß die Richtung der chemischen Reaktionen von dem elektrischen Vorzeichen stärker bestimmt ist als von der Zufallstatsache der speziellen Eigenschaften des betreffenden chemischen Stoffes, dieses Grundgesetz ist also auch in der anorganischen Chemie sinnfällig zu erkennen.*)

Wir können also niemals über die Angreifbarkeit, Verdaulichkeit, Assimilierbarkeit, Oxydationsfähigkeit des Nahrungsmaterials Beobachtungen anstellen, ohne die arteigene elektrische Ladung der lebenden Gewebe mit in den Kreis der Betrachtungen zu ziehen. Ich habe im Jahre 1897 behauptet, daß die lebende Magenschleimhaut nur deshalb nicht mitverdaut wird, weil sie eine Elektrode ist und diese Vermutung seither in verschiedenen Schriften öfter wiederholt, ohne jedoch bei der Fachwelt das mindeste Interesse für diese mir so plausibel erscheinende Idee erwecken zu können. Während nach der elektrischen Betrachtungsweise es gar nicht anders sein kann, als daß die lebenden Gewebe von den Verdauungssäften nicht angegriffen werden können und nach dem Tode (Verschwinden der normalen Ladung) angedaut werden müssen, sind die rein physiologisch-chemischen Hypothesen über diesen so oft beobachteten Vorgang alle sofort nach ihrem Auftauchen von reinen Physiologen widerlegt worden.

*) In dasselbe Gebiet gehört die Beobachtung, daß die herausgenommene Linse außerhalb des Körpers in ihrem eigenen Kammerwasser quillt. (Oppenheimers Biochemie. III. Bd. 2. p. 288.) Sie oder das Kammerwasser haben ihre Schutzladung verloren.



Seither habe ich noch eine ganze Reihe von Literaturbelegen über ähnliche Anzeichen der Ladungswirkung gesammelt.

So z. B. färben sich gewisse Bakterien außerhalb des Körpers nicht, jedoch phagozytiert ja.*) Solange sie ihre normale elektrische Oberflächenladung besitzen, kann der Farbstoff nicht in die Bakterienzelle eintreten, so wie sie jedoch in das Innere des Phagozyten aufgenommen werden, nehmen sie den Vitalfarbstoff, Neutralrot, auf. Nicht genug daran: Stirbt der Leukozyt, so entfärbt sich das eingeschlossene Bakterium wieder. Es gibt wohl kaum ein besser klappendes Beispiel für die elektrische Umladung der Kolloide, die die Färbung bewirken oder verhindern. Bei diesem Beispiel versagen auch alle geläufigen Theorien über die Wirkung histologischer Färbungen. Weder hat das Bakterium im Leib des weißen Blutkörperchens seine chemische Stoffanordnung sofort ändern können, weil es verschluckt wurde, oder gar deshalb, weil der Leukozyt, der es einschloß, abstirbt. Noch ist es vorstellbar, daß die sogenannte Semipermeabilität der lebenden Gewebe sich mit einem Schlage ändert, wenn in der Außenwelt, im Leukozytenplasma, eine Veränderung vor sich geht, endlich ist auch die Idee der Adsorptionswirkung oder der „Basophilie“ oder „Azidophilie“ in diesem Falle unbrauchbar, denn das Bakterium im Leukozytenleib ist doch nicht plötzlich durch den Tod des Leukozyten sauer oder basisch geworden.

Was sich in der Magenschleimhaut besonders eindrucksvoll vollzieht, ist in Wahrheit eine der allgemeinsten Erscheinungen des Körpers. Die genaueren Nachforschungen haben ergeben, daß die meisten Körperorgane pepsinogene und trypsinogene Gewebssäfte enthalten und sich doch niemals im Leben, sondern immer erst nach dem Absterben verdauen.

Die Schutzladungen, die in der Regel im lebenden Gewebe kathodisch sind (die Säuredrüsen, Wurzelhaare der Pflanzen, Knäueldrüsen, Nieren-Glomeruli ausgenommen) sind die Ursache der bekannten Erscheinung, daß man lebende Zellen mit sauren (anodischen) Farben nicht tingieren kann und daß überhaupt die Herausarbeitung der Zellanoden, die von den stärkeren Kathoden überlagert werden, so schwierig gelingt. Ich habe unzählige Experimente vergeblich unternommen, bis es mir ge-

*) J. Plato (1900) zitiert nach Heidenhein (Plasma und Zelle) I. p. 462.

lungen ist, Anoden zu differenzieren, und zwar fast immer nur an Schnitten, und nicht an unverletzten Zellen.

Hier ist einer jener Punkte, an dem sich so recht ergibt, wie unzweckmäßig und wie unwissenschaftlich es ist, grundsätzlich davon auszugehen, daß bei der Beschreibung und Erklärung eines Lebensvorganges eine bestimmte Energieart (und wahrscheinlich die allerwesentlichste) einfach auszuschalten. Meines Erachtens müssen Beweise oder Belege für die Mitwirkung elektrischer statischer Ladungen an Lebensvorgängen überhaupt nicht aufgezählt werden. Es sollte sich a priori von selbst verstehen, daß Ausfällungen von histologischen Farbkörpern beispielsweise von diesen Ladungen zu mindest mitverursacht werden und erst dann wäre zu untersuchen, ob nicht arteigene chemische Besonderheiten gewisser Teile der Zelle diese Grundursache mit beeinflussen können, was selbstverständlich bestehen bleibt.

DAS DIELEKTRIKUM IN DER ORGANISCHEN NATUR.

Es ist ein alter Einwand gegen alle elektrischen Stoffwechselhypothesen, daß in den Organismen alle Isolationssubstanzen fehlen. Wenn man physiologische Präparate auf ihre Leitfähigkeit untersucht, so erweisen sie sich immer als leitfähig. Diese Untersuchungen wurden bisher ausnahmslos an makroskopischen Objekten unternommen, die von Flüssigkeitsfäden durchsetzt, gewöhnlich auch von einer feinen Wasserhaut bedeckt sind und elektrolytisch leiten müssen. Damit ist aber keineswegs festgestellt, daß auch alle einzelnen Zellelemente elektrolytisch leiten, es ist vielmehr mit Bestimmtheit zu erwarten, daß in den Organismen wirksame Isolationssubstanzen vorhanden sind und daß ihre Intaktheit ein Hauptmerkmal des lebenden Protoplasmas ist.

Das Bestehen von guten, sogar sehr guten Isolatoren ergibt sich schon aus der Tatsache, daß an den kleinsten greifbaren physiologischen Objekten Ströme von 0,08 Volt Spannung zwischen Längs- und Querschnitten gemessen werden, Ströme, deren Pole durch ganz dünne, nur im Mikroskop sichtbare Membranen von einander getrennt sind. In der technischen Praxis dürfte man kaum dielektrische Körper besitzen, die eine so ideale Isolationsfähigkeit aufweisen. Am erstaunlichsten ist die

physiologische Isolation bei den elektrischen Fischen, wo Potentiale von 30 Volt und noch höhere durch dünne Membranen gut isoliert sind. Es ist das eine ganz erstaunliche Leistung, die mit dem gleichen Substanzaufwand wohl von keiner künstlichen Isolator-Konstruktion erreicht wird.

Das dielektrische Komplement zu den elektrolytischen Körperflüssigkeiten ist nicht nur ein Kennzeichen des Lebens, es ist gleichsam auch ein Gradmesser der höheren Entwicklung des betreffenden Organismus. Höhere Organismen mit ihren zahlreichen Spezialorganen, mit ihren tausendfältigen Impulszentren und Erregungsleitungen benötigen mehr und kompliziertere Isolationselemente als niedrigere Organismen und sind auch in ihren elektrolytischen Leitungselementen schlechter leitend als die niederen Organismen. Man kann dies am besten an den Meerestieren beobachten, die in ihren niederen Formen in ihren Säften mit dem Meer isotonisch sind, also einen Elektrolyten von wechselnder Leitfähigkeit besitzen, während die höheren Tiere des Meeres salzärmere, schlechter leitende Elektrolyte in ihren Gefäßen zirkulieren lassen.

Ist es ein Zufall, daß alle Isolatoren der technischen Praxis, daß Harz, Kautschuk, Bernstein, Öle, Pelze, Fuchsschwänze, Haare aus der organischen Welt stammen und daß die weit überwiegende Masse der starren Erdrinde und die ganze glühend flüssige Masse des Erdinnern aus Elektrolyten bestehen? Ausnahmsweise findet man wohl auch in der festen Erdrinde Quarzkristalle, Schwefel und andere Isolatoren, aber in Mengen und in Anordnungen, welche erkennen lassen, daß die Dielektrika für die Weltkörper keine lebenswichtige Bedeutung haben und vielleicht nur in der Atmosphäre eine wichtige Rolle spielen. Erst mit dem Auftreten der ersten lebenden Zelle auf der Erde ist das Dielektrikum als solches erschienen und je höher die Organismen sich aus der einfachen Zelle entwickelt haben, um so verfeinerter und vielfältiger sind sie von Isolationsbahnen durchsetzt. Von dieser Seite gesehen, erscheint die elektrolytisch-dielektrische Differenzierung geradezu als Anfang und Kennzeichen des organischen Lebens auf der Erde und die höhere Tierwelt mit ihren Nervenfibrillen als das Endglied einer langen Entwicklungsreihe in der Ausbildung spezialisierter und isolierter elektrischer Potentialwirkungen.

Mit Ausnahme der Pflanzen, bei denen größere Massen von Harzen und anderen dielektrischen Substanzen in greifbarer Form auftreten, aber an Stellen, an denen ihre isolierende Wirkung im Elektrizitätshaushalt vorläufig nicht zwingend beweisbar ist, treten die Dielektrika nur in Form von mikroskopisch dünnen Objekten auf, gewöhnlich noch in Begleitung einer dünnen Flüssigkeitsschicht. Unter diesen Umständen erscheint der experimentelle Nachweis der dielektrischen Natur als ein unlösbares Problem. Es lag am nächsten, die Doppelbrechung der Dielektrika im elektrostatischen Felde zum Nachweis zu benützen, allein dies ist ein mikroskopisch-technisches Problem, dessen Durchführung meine Kräfte übersteigt, zumal da meine Farbenblindheit mir das Arbeiten mit dem Polarisationsmikroskop sehr erschwert. Ich habe geglaubt, daß die Doppelbrechung im elektrischen Felde einerseits, die magnetische Drehung der Polarisationsebene im elektrolytischen Leiter andererseits eine Möglichkeit geben wird, Dielektrika von Elektrolyten optisch zu differenzieren, vielleicht sogar Ort und Richtung mikroskopischer Elektrizitätswirkungen sichtbar zu machen. Diesen Versuch habe ich jedoch bald aufgegeben, zumal da ich nur eine ganz unzulängliche Apparatur für derartige Experimente besaß.

Erst viel später, nachdem ich die Versuche längst aufgegeben hatte, ist mir eine Möglichkeit eingefallen, die vielleicht leichter zum Ziele führen könnte. Die Dielektrika werden, wie bekannt, nach ihrer Dielektrizitätskonstante in eine sogenannte Spannungsreihe geordnet, die angibt, welche Substanz beim Reiben mit der andern positiv elektrisch wird. Die Substanz mit der höheren Dielektrizitätskonstante wird immer positiv elektrisch. Naturgemäß kann man mikroskopische Zellelemente nicht durch Reiben elektrisch differenzieren, da aber dasselbe Gesetz auch für die kapillarelektrischen Erscheinungen gilt, so eröffnet sich hiedurch ein Weg, die Dielektrizitätskonstante gewisser Zellelemente angenähert durch Filtrationsversuche unter Druck zu bestimmen.

Hätte man beispielsweise die Dielektrizitätskonstante des Endothels der Nierenglomeruli zu untersuchen, so müßte man Flüssigkeiten von verschiedener Leitfähigkeit derart durch sie hindurchpressen, daß die erste Annäherung seiner Dielektrizitäts-Konstante sich erkennen läßt. Man würde die Versuche einmal

von der Arterie zum Harnleiter, einmal umgekehrt anordnen, einmal durch eine Luftsaugpumpe von den Arterien zu den Venen ableiten, einmal die Venen oder den Harnleiter absperren, einmal vom Harnleiter bei abgeklemmten Arterien in die Venen einpressen, um schließlich ein Bild davon zu gewinnen, welchen Anteil die einzelnen Gewebselemente und Kapillarepithelien und -endothelien an der entstehenden Potentialdifferenz haben. Wenn es gelänge, das Endothel des Glomerulus oder ein anderes Gewebselement zu vergolden oder zu versilbern, während die anderen Gewebselemente unbeschädigt bleiben, eine Aufgabe, die durch elektrolytische Durchströmung in bestimmten Richtungen vielleicht lösbar wäre, so wäre dadurch die Möglichkeit geschaffen, die Isolierfähigkeit einer bestimmten Gewebsart ziemlich scharf, gesondert von den übrigen, zu erfassen.

Wenn diese Versuche an der Niere mit Blut oder Serum unter gewöhnlichem Blutdruck gemacht werden, so würde sich ergeben, ob der gewöhnliche Blutdruck genügt, um eine nennenswerte kapillarelektrische Potentialdifferenz zu erzeugen, welche imstande ist, lebenswichtige Stoffwechselvorgänge auszulösen. Die Tatsache, daß die bisherigen Ultrafiltrationen solche elektrische Potentiale nicht ergeben haben, ist nicht ausschlaggebend. Das Verhältnis zwischen wirksamer Fläche und Masse der Flüssigkeit ist in der Niere, und überhaupt im Körper, unvergleichlich günstiger als bei Laboratoriums-Filtrationen. Es ist ein Hauptkennzeichen der in kleine Zellen unterteilten Membranentwicklung der Organismen, daß die wirksame Membranfläche im Vergleich mit den durch sie hindurchtretenden Flüssigkeitsmengen sehr groß ist.

Dort, wo es nicht angeht, durch Hindurchpressen von Flüssigkeit den dielektrischen Charakter der Zellelemente zu studieren, wie bei gewissen Epithelien der Tiere und bei der Oberhaut der Pflanzen würde es vielleicht möglich sein durch Reibung mit bestimmten positiven und negativen Gasen, durch Anblasen mit Gasen bestimmter Dielektrizitätskonstante statisch aufzuladen und nachher mittels des Bestäubungsverfahrens das Vorzeichen der Ladung zu bestimmen. Für einen geschickten Experimentator erscheint mir dieser Weg gangbar, um die elektrisch isolierenden Zellelemente aufzufinden und zu bestimmen.

Schließlich ließe sich auch noch die Eigenschaft gewisser Thoriumstrahlen, an elektropositiven Punkten haften zu bleiben, vielleicht dafür ausnützen, ein feiner verteilbares Reagens als Schwefel-Mennigpulver für die Untersuchung zu gewinnen.

Es gibt ein Experiment, das einen ungefähren Rückschluß auf die Höhe der Dielektrizitätskonstante eines lebenden Gewebes zuläßt, wenngleich es nicht zu dem Zwecke einer Untersuchung biologischer Dielektrizitätskonstanten angestellt worden ist, vielmehr von der Absicht diktiert war, neuerlich zu demonstrieren, daß der menschliche Körper ein „Leiter der Elektrizität" ist. Das ist er, als Ganzes genommen, auch unzweifelhaft, wegen der toten Flüssigkeitshaut, von der er bedeckt zu sein pflegt und wegen der Elektrolytbahnen, die ihn innerlich durchsetzen. Daß er jedoch auch dielektrische Gewebe enthält, ist nicht zu bezweifeln und wurde durch die in Rede stehenden Versuche von S. Tereschin und G. Georgiewsky*) neuerlich zur Untersuchung gebracht.

Die beiden Experimentatoren, beide anscheinend Physiker und nicht Biologen, beabsichtigen ältere Versuche von A. Heydwiller**) zu widerlegen, welcher gefunden hatte, daß auf einem Glasschemel isolierte Menschen beispielsweise beim Biegen des Ellbogengelenks negative Ladungen an der Handfläche erzeugten und diese Ergebnisse dahin deutete, daß die älteren Vorstellungen über die einfache Leiternatur des menschlichen Körpers mangelhaft seien. In der Tat konnten Tereschin und Georgiewsky zeigen, daß der ältere Versuch die reibungselektrische Wirkung der Kleidung vernachlässigt hatte. Sie erhielten je nach dem Material des Isolierschemels, den der nackte Fuß berührte, Ladungen wechselnden Vorzeichens und stellten folgende Spannungsreihe auf:

Glas, menschlicher Körper, Baumwolle, Holz, Seide, Paraffin, Ebonit.

Eben diese Spannungsreihe zeigt jedoch, daß die Dielektrizitätskonstante des Gewebes der Fußsohle in erster Annäherung zwischen Glas und Baumwolle zu setzen ist, also minimal auf

$$4 — 10 \text{ (leerer Raum} = 1)$$

je nach der verwendeten Glassorte. Die Dielektrizitätskonstante

*) Physikalische Zeitschrift, 8. Band. p. 569 (1907).

**) Ann. der Physik, 8. Band (1902).

dieser Gewebeart wäre sonach höher als die aller künstlichen Isolatoren mit Ausnahme von bestem Isolierglas.

Naturgemäß ist diese Konstante nur die erste rohe Schätzung des makroskopischen Gewebes, des aus den verschiedensten festen Elementen und aus funktionierenden Flüssigkeitsdrüsen (Schweißdrüsen) besteht. Die Spannungsreihe würde ganz anders ausfallen, wenn die Haare, die Knochen, die Nägel u. s. w. an den Isolierschemel angrenzen würden. An Stelle des Wortes „menschlicher Körper“ wäre also in obiger Spannungsreihe zu setzen „menschliche Fußsohle“, und die Dielektrizitätskonstante zu spezialisieren auf den besonderen Fall (Luftfeuchtigkeitsgehalt, Luftdruck, Temperatur, körperlicher Zustand der Versuchsperson), unter dem diese Konstante bestimmt worden ist.

Die Vernachlässigung der für statische Potentialdifferenzen brillant leitenden Wasserhaut aller belebten (und der meisten unbelebten) Körper ist ein Versuchsfehler, dem man so ziemlich bei allen elektrostatischen Experimenten begegnet, die sich in der Literatur vorfinden. Man vergißt dabei die Tatsache, daß die Feuchtigkeitsschicht, die sich von selber auf dem Quarzfaden zu bilden pflegt, der Leiter ist, mit dem bei elektrostatischen Meßversuchen die minimalsten Potentialdifferenzen übertragen und gemessen werden, und man behandelt lebende Objekte, deren Wassergehalt innen und außen den des Quarzfadens um ein Vielfaches übertrifft, gewohnheitsmäßig als homogene Körper. Wenn diese Methode schon bei toten und leblosen Objekten unzulässig ist, so ist sie für lebende Zellen, deren Hauptkennzeichen ihre Differenziertheit, ihre bis ins Ultramikroskopische gehende Inhomogenität ist, direkt irreführend.

DIE ELEKTRISCHEN FISCHE.

Eines der interessantesten Kapitel der Elektrophysiologie ist das der elektrischen Fische, des afrikanischen Zitterwels (Malopterurus electricus), des Torpedo, des Zitteraal (Gymnotus electricus) und anderer schwächer elektrischer Fische. Diese merkwürdigen Tiere haben eine Energie, die zweifellos in allen primitiven Tier- und Pflanzenzellen vorhanden ist, die elektrostatische Energie, in besonderen Organen spezialisiert und zu großen Leistungen summiert. Sie teilen Schläge von 70 Volt und

mehr aus, die Menschen und Pferde nahezu betäuben und kleine Fische töten können.

Die Organe der elektrischen Fische haben alle das Gemeinsame, daß sie den elektrostatischen Apparaten sehr ähnlich sehen; sie geben das typische Bild von hintereinander geschalteten reibungselektrischen Platten-Kondensatoren, es fehlen selbst nicht die an den Platten senkrecht stehenden Zähnchen, mit denen die Reibungselektrisiermaschinen Entladungen abnehmen. (Diese Stäbchen sind nach anfänglichen Kontroversen gegenwärtig von allen Forschern anerkannt und bestätigt.) Es fehlt nicht die diskontinuierliche Natur der Entladungen und es ist im höchsten Grade merkwürdig, daß die Elektrophysiologie diesen eklatanten Tatsachen gegenüber immer wieder von „Strömen" spricht, obzwar nicht ein einziger der vielen Untersucher bisher einen wirklichen Strom, das heißt eine kontinuierliche Elektrizitätsbewegung bei elektrischen Fischen beobachtet hat. Wenn ich hier einige Tatsachen über Anatomie und Histologie der elektrischen Fische anführe, so geschieht es nicht deshalb, um diese so oft hervorgehobene Unterscheidung von neuem an einem Beispiel zu belegen, sondern deshalb, weil auch bei diesem Objekt mit seiner ziemlich genau untersuchten Polarität die Richtung des Elektrizitätsgefälles genau mit den Färbungen übereinstimmt, also einen weiteren Fingerzeig dafür gibt, daß diese Tinktionen von dem Faktor Elektrizität entscheidend beeinflußt werden.

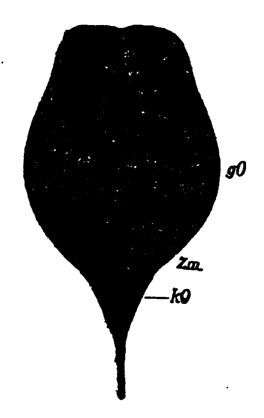


Fig. 10. Querschnitt durch den Rumpf von Gymnotus. *gO*=großes Organ; *kO*=kleines Organ; *Zm*=Zwischenmuskelschicht.

Zunächst einige Zeichnungen vom elektrischen Organ des Gymnotus aus Biedermanns „Elektrophysiologie" (p. 758 ff).

Wie die vorerwähnten Stäbchen, oder Zähnchen, wie ich sie lieber nennen möchte, sich von der Platte abheben, sei an der Zitterrochenart Raja circularis demonstriert.

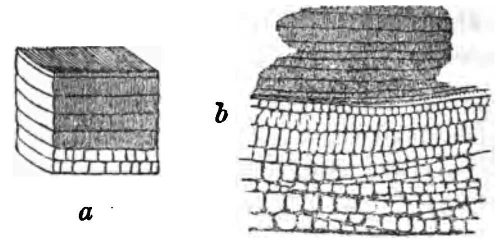


Fig. 11. a) Ein Stück aus mehreren übereinanderliegenden Säulen von Gymnotus (unten zwei weitfächerige). (Nach Pacini.)
b) Längsschnitt durch weit- und schmalfächerige Säulen von Gymnotus. (Nach Du Bois-Reymond.)

Wer diese Zeichnungen ansieht, kann niemals daran zweifeln, daß keine Konfiguration ungeeigneter sein könnte für die Erzeugung eines kontinuierlichen „Stromes" senkrecht zu der



Fig. 12. Raja circularis; Teil eines Längsschnittes durch einen elektrischen Becher. n = Nerven- und kernführende Schicht; m = Maenderschicht; a = Alveolarschicht. (Nach Ewart.)

Richtung der ausgezeichnet isolierten Platten (abgesehen davon, daß ein solcher Strom auch niemals beobachtet wurde).

In bezug auf die Richtung des Elektrizitätsgefälles hat nun einer der ältesten Beobachter, Pacini, schon 1847 die Regel ausgesprochen, daß (nach Biedermann zitiert) „die Nervenverbreitung beim Zitterrochen und Zitteraal immer an jener Fläche der Platten erfolgt, welche beim Schlagen negativ wird, d. h. bei Torpedo an der unteren, beim Gymnotus an der hinteren. Bei dem letzteren hatte schon Faraday durch Jodkalium-Elektrolyse den Nachweis geliefert, „daß jeder Punkt des im Wasser befindlichen Fisches oder seiner nächsten Umgebung sich negativ verhält gegen jeden am Fisch davor und positiv

gegen jeden dahinter gelegenen, ferner daß die Wirkungen um so stärker sind, je weiter auseinander gelegene Punkte man berührt, während sie bei Ableitung symmetrisch zur Sagittalebene verschwinden". Es wird dies verständlich, wenn im Augenblick des Schlages die vorderen Flächen aller elektrischen Platten positiv, die hinteren negativ sich verhalten, wie Du Bois-Reymond auch an einem untergetauchten Säulenmodell aus zusammengelöteten Platin-Zink-Elementen zeigte (4 d. II. p. 863). Der Strom wird demnach die Organsäulen selbst im allgemeinen aufsteigend (in „positiver" Richtung), d. h. vom Schwanze kopfwärts durchsetzen.

Da sich Bilharz überzeugt zu haben glaubte, daß auch beim Zitterwels der Nerv an die hintere Fläche jeder einzelnen Platte tritt, so schloß er ohne weiteres, daß die Schlagrichtung der des Zitteraales entsprechen würde, ohne jedoch den Versuch wirklich anstellen zu können. Du Bois-Reymond zeigte dann, daß entgegen der Erwartung der Schlag im Organe des Zitterwelses unabänderlich vom Kopfe nach dem Schwanz gerichtet ist, also entgegen der Pacini'schen Regel. Dasselbe gilt übrigens auch für Raja".

Aus dieser Erwähnung, aus der nebenbei hervorgeht, daß schon der alte Faraday fast vor 100 Jahren mittels der Zellelektrizität Färbungen elektrolytisch erzeugte, daß also die Idee, diese Tinktionen auf elektrische Mitwirkung zu beziehen, weder neu noch originell ist, ist zu ersehen, daß die Pacinische Regel beim Zitterwels (Malopterurus) zu versagen scheint.

Nun ist aber Pacinis Regel von 1847 jedenfalls sinngemäß nur so aufzufassen, daß die Nervenausbreitung durch ein elektrisch gleichwertiges Gewebe ersetzt werden kann. Es konnte doch unmöglich einem Naturforscher, der vor 70 Jahren mit den damals ganz unzulänglichen Hilfsmitteln arbeitete, zugemutet werden, daß er sich gerade auf ein nur optisch bestimmtes histologisches Element festlegt.

Die genaueste Histologie des Malopterurus besitzen wir von Ballowitz,*) der aber auch die Pacinische Regel buchstabengetreu auffaßt. In seinen brillanten Bildern und Beschreibungen zeigt er jedoch, daß eine von ihm als „Trichterstiel" be-

*) Das elektr. Organ des afrikan. Zitterwelses. Emil Ballowitz. Jena. Fischer. 1899.

zeichnete Bildung, die an den Endknopf der Nervenausbreitung anschließt, sich ebenso kathodisch (Gold und Silber reduzierend) verhält wie der Nerv, und daß diese Kathode die elektrische Platte durchbricht und ihre Hauptmasse auf der Vorderfläche

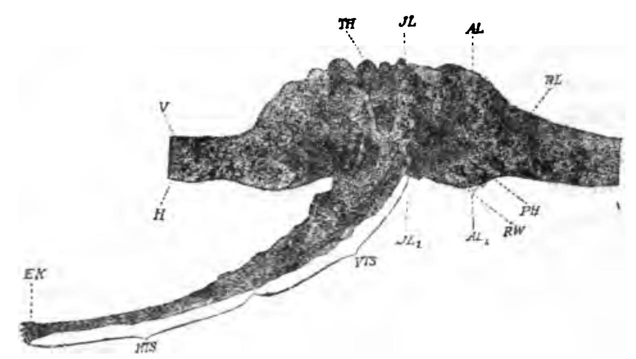


Fig. 13. Der Trichterstiel im Querschnitt (stark vergrößert).

verbreitet. Es stimmt also elektrohistologisch die Elektronegativität der Entladung genau mit der Ausfärbung überein, nicht nur bei allen elektrischen Fischen der alten Pacini-Regel, deren Nerven direkt auf der Vorderfläche endigen, sondern auch beim Malopterurus.



Fig. 14. Der Trichterstiel in der Aufsicht. (Der Stiel durchbricht die Platte und kommt auf der Vorderseite heraus.)

Man betrachte die hierstehenden Zeichnungen (Fig. 13 und 14) von Ballowitz mit der Hinzufügung, daß der Trichterstiel sich nach dessen Angaben in Goldchlorid dunkelviolett färbt.

Auch die Stäbchen färben sich reduzierend, also kathodisch so wie es von der elektrochemischen Hypothese der Tinktionen gefordert wird.

Dieses weitere Beispiel der vollen Übereinstimmung zwischen mikroskopischer Färbung und experimentell festgestellter Elektrizitätsladung, denen sich unzählige andere anreihen ließen, ist deshalb so hervorgehoben, weil es meines Erachtens erkennen läßt, daß die energetische Betrachtung der mikroskopi-

schen Bilder vor der bloß mechanisch-chemischen Manches voraus hat. Es wäre energetisch nicht einmal notwendig (was tatsächlich der Fall ist), daß Trichterstiel und Endnerv sich unmittelbar berühren, man könnte sie sich durch eine Isolierlamelle isoliert denken und trotzdem würde die Elektrizität durch Influenz am anderen Ende des Trichterstieles gleichsinnig negativ zur Entladung gelangen. Vermutlich hat die einfache Zelle die elektrische Kraftübertragung auf drahtlosem (dielektrischem) Wege längst ins Werk gesetzt, ehe die Menschen die drahtlose Kraftübertragung nacherfunden haben werden, ganz sicher aber bewirkt sie die drahtlose Impulsübertragung, die Reizauslösung, ohne dazu einen Elektrizitätsleiter im alten Sinne zu benötigen.

GERICHTETE CHEMISCHE KRÄFTE.

Was mir als Fundamentalgesetz und Hauptkennzeichen der lebenden Materie im Gegensatz zur anorganischen Welt erscheint, ist etwa folgendes:

Die chemischen Kräfte in den lebenden Zellen sind nicht einfach vergleichbar den chemischen Kräften im Laboratorium oder in der anorganischen Materie, sie sind von ihnen in der Hauptsache dadurch unterschieden, daß sie *eine im Raum ausgezeichnete Richtung* haben. Diese Unterscheidung wird manchem nicht neu oder nicht von Bedeutung erscheinen, ist aber doch von grundlegender Wichtigkeit für das Verständnis biochemischer Probleme. Alle die zahlreichen Versuche, die man angestellt hat, um physikalisch-chemische Gesetze in der Zellphysik und Zellchemie quantitativ nachzuprüfen, mußten mißglücken infolge der Vernachlässigung dieses wichtigen Faktors, der mir als das Fundamentalgesetz der Molekularphysik der Zelle erscheint.

Diese Betrachtung hätte eigentlich an die Spitze dieser Arbeit gehört. Die Furcht jedoch, den Leser mit Theoretisieren und Unterscheidungen gleich in der Einleitung abzuschrecken, ist der Grund dafür, daß einige konkrete Beispiele dieser Grundanschauung vorerst vorgeführt wurden. Nun ist keineswegs gemeint, daß elektrische Ladungen allein die Ursache davon sind, daß lebende Zellen oder Zellgruppen, die uns chemisch ganz identisch erscheinen, bald basisch, bald sauer zu wirken scheinen,

bald oxydierend, bald reduzierend, kurz das gerade Gegenteil dessen erkennen lassen, was wir gewohnt sind, als chemische Grundregeln anzusehen. Außer den elektrischen Ladungen wirken bei der großen Oberflächenentwicklung biologischer Gewebe höchstwahrscheinlich Oberflächenspannungen, Kapillarkräfte, Kolloidkräfte in demselben Sinne, um den chemischen Kräften bestimmte, durch die betreffene Zellart räumlich fest umrissene Richtungen zu geben. Infolgedessen ist es auch leichter zu verstehen, daß jede Zelle, welche optisch aktive chemische Verbindungen erzeugt, immer nur jene rechtsdrehenden oder linksdrehenden Isomeren liefert, die der betreffenden Zellart arteigen sind. Bei vielen Isomeren kennt man überhaupt kein anderes Mittel, die Razemkörper in ihre Isomeren aufzuspalten als lebende Zellen, z. B. Bakterien.

Der Unterschied zwischen einer Kraft ohne bestimmten Richtungssinn und einer mit ausgezeichneter Richtung bildet in der höheren Mathematik das Gebiet der „Vektoranalysis". Was ein Vektor ist, wird in W. v. Ignatowskis „Vektoranalysis"*) mit folgenden Worten bezeichnet: „Man unterscheidet in der Physik zwei Arten von Größen: S k a l a r e und V e k t o r e n. Ein Skalar stellt einen Zahlenwert dar, welcher das Verhältnis zu derjenigen Einheit angibt, die zur Messung der betreffenden Größe dient. Zu dieser Art von Größen gehört die Temperatur, Dichte, Energie u. a. Ein Vektor besitzt außer dem erwähnten Zahlenwert noch eine bestimmte Richtung. Deshalb unterscheiden sich die Vektoren untereinander nicht nur durch ihre Zahlenwerte, sondern auch durch ihre Richtungen . . . Vektoren sind z. B. Kraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung etc. . . ."

Die Gesetze der heutigen physikalischen Chemie handeln, soweit sie für Biochemie in Betracht kommen, ausschließlich von skalaren Größen, sind also für quantitative Versuche in der belebten Welt ganz unverwendbar. In den „Elektrostatischen Zellkräften" **) heißt es über diesen Gegenstand:

„Um die Aussichtslosigkeit solcher Bemühungen zu erkennen, muß man sich vor Augen führen, daß in mathematischer Beziehung folgender Fundamentalunterschied zwischen Laboratoriumsphysik und Zellphysik besteht: Die Molekularphysik enthält unausgesprochen die Voraussetzung, daß der Raum im In-

*) Leipzig, B. G. Teubner, 1909.
**) p. 31 ff.

nern einer Flüssigkeit oder eines Kolloids homogen und isotrop ist, das heißt, daß der Raum in allen seinen Punkten gleichwertig ist und keine energetisch ausgezeichnete Richtungen hat. In Wahrheit ist diese Voraussetzung nicht einmal für die anorganische physikalische Chemie rein aufrecht zu erhalten. Man ist gezwungen, mit Flüssigkeitsoberflächen, mit Glasgrenzflächen, mit Licht- und Wärmestrahlen-Einwirkung, kurz mit allerlei möglicherweise schwach katalytischen Nebeneinwirkungen zu rechnen, die gewöhnlich klein genug sind, um vernachlässigt werden zu können. Wenn ein Physiko-Chemiker beispielsweise einfache Reaktionen dadurch komplizieren würde, daß er die Agentien durch eine poröse Kapillarwand durchpressen würde, oder elektrische Kräfte mitwirken würden, so weiß er ganz genau, daß quantitativ veränderte Umsetzungen resultieren würden.

Es begreift sich leicht, daß die organische Welt in sich das Gegenteil der unausgesprochenen Voraussetzung der reinen Chemiker enthält. Die Zelle ist im Leben niemals homogen, niemals isotrop, niemals in allen Richtungen energetisch gleichwertig, sie enthält das gerade Gegenteil der Voraussetzung der anorganischen physikalischen Chemie. Sie besteht aus lauter Kapillarräumen, in denen die chemischen Reaktionen anders verlaufen als im homogenen Raum, sie enthält in jedem Zellteil besonders orientierte chemische Energien, die eine gleichsinnige Reaktion im Leben ausschließen, selbst wenn man von der Annahme absieht, daß jede Zelle während des Lebens arteigene elektromagnetische und elektrostatische Energien enthält, die eine lebenswichtige Funktion erfüllen."

Die Feststellung, daß die chemischen Kräfte der lebenden Zelle nicht einfach den anorganischen chemischen Kräften vergleichbar sind, ist eine rein negative Erkenntnis, mit der man auf den ersten Blick nichts anzufangen weiß. Aber es gibt doch schon eine Folgerung, die uns einen ordnenden Blick in den scheinbar dadurch noch mehr komplizierten Chemismus der Zelle tun läßt, nämlich die allgemeine Regel, daß jeder Energiesammler seine Energie in der entgegengesetzten Richtung der Aufladung entlädt. Von dieser Regel ist bisher keine Ausnahme bekannt; ob es sich um ein Uhrgewicht handelt, das in der umgekehrten Richtung des Aufziehens seine Energie abgibt, ob um eine Stahlfeder, ob um einen elektrischen Akkumulator, der

in der entgegengesetzten Richtung der Aufladung sich entlädt: immer kehrt sich bei der Entladung die Kraftrichtung um; die lebende Zelle, die zweifellos ein Energie-Akkumulator ist, u. zw. nach der heutigen Auffassung ein Akkumulator von chemischer Energie, kann sich nicht anders entladen als in der entgegengesetzten Richtung der Aufladung.

Für das Aufsammeln von Energie hat die Physiologie einen eigenen Namen: sie nennt es „Assimilation", für das Entladen gilt die Bezeichnung „Dissimilation". Wir haben jetzt zwei Hauptsätze der Zell-Energetik:

1. Die chemische Energie der Zelle ist ein Vektor.

2. Die zwei Hauptrichtungen dieses Vektors sind: die positive assimilatorische, die negative dissimilatorische.

Diese beiden Leitsätze sind unabhängig davon, ob die chemischen Zellkräfte elektrisch oder sonstwie dirigiert werden, sie sind ganz allgemeiner Natur, aber sie machen Manches verständlich, was sich bisher nicht befriedigend in unsere chemischen Denkgewohnheiten einordnen ließ, zum Beispiel die allen Histologen geläufige Tatsache, daß gewisse Zellelemente mit gewissen chemischen Stoffen, besonders mit Teerfarben, manchmal sich verbinden, manchmal aber ganz im Gegenteil sich invers färben. Das heißt, der Kern derselben Zelle färbt sich in dem einen Fall, das Protoplasma bleibt ungefärbt. Dieselbe Zelle, deren Chemismus anscheinend identisch ist, färbt dann wieder mit demselben Farbstoff das Protoplasma und den Kern nicht.

Gewöhnlich verhält es sich so, daß in dem vorher fixierten, also getöteten (energetisch im Entladungssinn gerichteten) Gewebe dieselben chemischen Stoffe an denselben Orten ein Negativ geben von der Färbung derselben Zelle durch dieselben Farbstoffe während der Assimilation, also während des Aufladungszustandes im Leben. Diese Tatsache ist den Biologen immer schon aufgefallen und man hat die seltsamsten Hypothesen aufgestellt, um zu erklären, daß dieselben chemischen Stoffe sich in verschiedenen Zuständen anscheinend entgegengesetzt verbinden. Wenn man sich aber erst einmal zu der Überzeugung durchgerungen hat, daß man gewisse Vorurteile der Laboratoriumschemie bei der Zelle abstreifen muß, so begreift man, daß es gar nicht anders sein kann.

Dieser erste Versuch einer rohen Uebersicht der chemischen Richtungen in der Zelle kann natürlich nur die gröbsten Elemente der Betrachtung erfassen. Die organische Zelle als Kraftaufsammler ist allen unseren künstlichen Akkumulatoren im Aufbau und in der Organisation so unvorstellbar weit voraus, daß die aus unserer technischen Praxis geholten Vergleiche sicher oft falsch sind. Auch können die Worte dissimilatorisch und assimilatorisch nicht die Vielheit der spezialisierten Zellreaktionen wiedergeben. Es ist auch nicht unmöglich, daß in Spezialzellen hochorganisierter Tiere die Zellen nicht einfach einen Kraftvektor mit positiver und entgegengesetzt negativer Richtung enthalten, sondern daß sie auf der einen Seite mit Energie beladen werden, diese transportieren und sie anderswo abgeben, wie es auch in der technischen Praxis bisweilen geschieht.

Augenfällig erscheint mir als sicheres Axiom, daß in den lebenden Zellen zwei entgegengesetzte Kraftrichtungstendenzen obwalten, die aufladende und die entladende, und daß nach der durch den Zell-Tod hervorgerufenen Ausschaltung der primären, ladenden Energie sicher der Entladungsvorgang und seine Kraftrichtung die Zelle beherrscht und ihrem Chemismus sein Gepräge aufprägt.

Bei jeder chemischen Analyse der Zelle, bei jeder Feststellung ob ein Zellelement sauer, basisch oder neutral ist, muß also immer der Hauptumstand in Betracht gezogen werden, in welchem Zustand der Zelle die azidophile oder basophile Natur des betreffenden Zellelements hervorgetreten sein soll.

Daß die Kräfte in der lebenden Zelle eine arteigene Richtung und Intensität haben, ist ein allgemeines Gesetz, das sicher nicht etwa auf die chemischen und elektrischen Kräfte der Zelle beschränkt ist. In ganz gleicher Weise ist auch die Wärmebewegung in den Zellen eine geordnete, von bestimmten arteigenen Punkten ausgehend nach bestimmten arteigenen Richtungen.

Es ist überhaupt schon in der reinen Physik eine nicht ganz einwandfreie Methode, mit welcher mit dem Begriff der „ungeordneten" (diffusen) Wärmebewegung operiert wird. Die Gleichungen der Thermodynamik würden an innerer Folgerichtigkeit bedeutend gewinnen, wenn man die Molekularbewegung

der diffusen Wärme nicht einfach als „ungeordnet" bezeichnen würde, sondern als von einer Ordnung, die wir nicht begreifen. Aber diese Frage gehört nicht hieher, sicher ist es, daß die Temperaturen der Organe höherer Tiere mit ihren regelmäßigen, auf Zehntel Grade genauen Gefällen erkennen lassen, daß regelmäßige Richtungen des Wärmetransportes und der -Strahlung existieren, die jeder Art eigentümlich sind.

Die Nichtbeachtung der Richtung der Energiestrahlung lebender Zellen und Zellorganismen ist eine jener vielen Unterlassungen, die aus der einseitig optischen, auf grob materiell-chemischen Merkmalen aufgebauten Mikroskopiergewohnheiten der heutigen Naturforschung entspringen. Man vergißt immer wieder, was schon so oft hervorgehoben worden ist, daß in jeder lebenden Zelle die Kraftlinien ebenso ihre arteigene Struktur haben wie die materiellen Linien und daß diese Letztere wahrscheinlich sekundäre Resultate der zuerst vorhandenen Energie-Richtungen sind.

STROMSTÄRKE.

Aus der Höhe der Spannungsziffer, die, wie ich glaube (schon wegen des minimalen Durchmessers der isolierenden Schichten) 10 Volt nicht überschreiten kann, ergeben sich Rückschlüsse auf die ungefähre Höhe derjenigen Größe, die man in der galvanischen Elektrizität als Stromstärke bezeichnet. Ich habe den Ausdruck Stromstärke, der für die biologischen Zellen im allgemeinen nicht zutrifft, absichtlich an die Spitze dieses Kapitels gesetzt, weil der entsprechende Ausdruck der statischen Elektrizität für die Kapazitätsgröße der Ladung auch nicht deutlicher wäre und es doch keineswegs feststeht, ob man es bei der biologischen Elektrizität nicht mit einer Kombination von statischer oder galvanischer Elektrizität zu tun hat.

Von den Messungs-Resultaten der elektro-physiologischen Forschung muß man natürlich aus den wiederholt berührten Gründen für die Beurteilung der Zellelektrizität absehen, denn der mit den unpolarisierbaren Elektroden abgeleitete Strom ist ein Artefakt aus der metallisch leitenden Verbindung zwischen künstlich hergestellten makroskopischen Mischflächen der verschiedensten Elektropolarität.

Betrachtet man die Menge Silber, die z. B. durch eine lebende Zelle aus seinen Salzen (ohne Lichteinfluß) abgeschieden werden kann unter dem Gesichtspunkt, daß dies ein elektrolytischer Vorgang ist, so entspricht ein Coulomb einer transportierten Silbermenge von 1,1 Milligramm. Nun ist ja 1,1 Milligramm unter dem Mikroskop in der Form des fein verteilten Silbers ein recht beträchtliches Quantum, aber die galvanische Einheit der Elektrizitätsmenge ist (im mechanischen Äquivalent ausgedrückt) ungeheuer groß, ein Coulomb entspricht nämlich der Arbeit von 1000 kg auf ein Kilometer Länge. Ein mikroskopisches Präparat, das im Dunkeln ein Tausendstel Milligramm Silber elektrolytisch ausscheidet, würde immer noch 1 kg 1000 Meter hoch heben können. Die überraschende Abstoßungskraft der lebenden Zelle im anodischen Berliner-Blau-Verfahren hat nach dieser Ueberlegung nicht mehr so viel Ueberraschendes.

Man hat also anzunehmen, daß in den mikroskopischen Präparaten eine sehr beträchtliche Elektrizitätsmenge steckt, und zwar in statischem Maß eine Menge, die im elektrischen Laboratorium ohne Beispiel ist. Unsere bisherige Technik der Erzeugung künstlicher statischer Elektrizität, überdies auch die natürliche statische Elektrizität einer so gewaltigen Naturerscheinung wie des Blitzes ist eine Vereinigung von (wieder falsch ausgedrückt:) kolossaler Spannung von Hunderttausenden Volt mit einer ganz minimalen „Stromstärke". Die Gründe dafür anzuführen, würde zu weit führen. Die Tatsache steht unbezweifelbar fest. Wir haben bis jetzt kein anderes Gefäß, in dem statische Elektrizität in erheblicher Wirkungsfähigkeit gesammelt oder bewahrt werden kann, als die Kondensatoren und deren Kapazität ist eine enge Grenze gesetzt einerseits durch die Dielektrizitätskonstante der technischen Isolatoren, anderseits durch die Flächenentwicklung, die bei makroskopischen Apparaten eine natürliche Grenze findet. Ob die lebende Zelle über bessere Dielektrika verfügt als die Technik, läßt sich heute nicht aussagen.

Daß dagegen die Flächenentwicklung in der lebenden Zelle eine ganz kolossale ist, kann nicht bezweifelt werden. Jede neue Verbesserung des Mikroskops und seiner Methoden bringt uns eine neue Entwicklung großer Flächen, Bänder, Fibrillen und

anderer kondensatorisch wirkender Gestaltungen. Darnach läßt sich wohl verstehen, daß die biologische statische Elektrizität von der künstlichen statischen Elektrizität graduell so stark verschieden ist, daß ihre Erscheinungsform möglicherweise Wirkungen hat, die uns noch unbekannt sind. Wir sind infolge der Eigenart der groben künstlichen Kondensatorentechnik gewohnt, mit dem Begriff „statische“ Elektrizität eine sehr hohe Spannung und eine minimale Elektrizitätsmenge untrennbar zu verknüpfen. In der biologischen Elektrostatik haben wir anscheinend das gerade Gegenteil.

DIE VOLTZAHL DER ZELLE.

Jacques Loeb hat kürzlich Versuche mit dem Quadranten-Elektrometer an lebenden tierischen und pflanzlichen Geweben unternommen.*) Die elektromotorischen Kräfte, die er fand, sind sehr klein, kaum größer als die mit dem Kapillarelektrometer gemessenen. Das Hauptresultat, das er findet, ist die Bestätigung des Nernst'schen Potentialgesetzes für lebende Gewebe. Dieses Ergebnis wäre ebenso wichtig wie überraschend. Loeb hat die Gewebe nicht nur an der Oberfläche abgetastet, sondern auch Verletzungen untersucht. Bei der Versuchsanordnung, die er beschreibt, ist es nicht unmöglich, daß die statischen Potentiale sich über die Wasserhaut**) an der Oberfläche unverletzter oder verletzter Gewebe durch elektrische Leitung ausgeglichen haben und daß Loeb dann ebenso wie ich bei meinen ersten Versuchen nur den uninteressanteren Teil der Elektrizitätsbewegung, die Leitung im unbelebten Elektrolyten bestimmt hat, während sich die Potentialverteilung im lebenden Gewebe nach wie vor durch elektrische Isolierung bisher der makroskopischen Beobachtung entzieht.

Die Gründe, weshalb die elektromotorische Kraft nicht in der Größenordnung von 0,1 Volt angenommen werden kann, wie sie Loeb makroskopisch bestimmte und wie sie alle Elektro-

---

*) Biochemische Zeitschrift, 41. Bd. (1912). p. 14.

**) Literatur über die Wasserhaut an Oberflächen. Emil Colmstädt (Physik. Zeitschrift 1909. p. 643). Bunsen. Wasserhaut auf Glas. 1885. Wiedemanns Annalen.

physiologen beschreiben, die mit nicht mikroskopischen Elektroden die Zellterritorien im Rohen abtasteten, sind folgende:

1. Experimente die auf die Kathoden und gleichzeitig auf die Zellanoden greifen, können nur einen Teil der tatsächlich vorhandenen Maximalspannung ableiten.

2. Die Flüssigkeiten saurer und basischer Natur, die im normalen Körper nahe beieinander entstehen und sich erhalten, setzen Spannungen von mindestens 1 Volt voraus.

3. Die Elektrolysen von Farbstoffen, Metallsalzen und sonstigen Reagentien, die man unter dem Mikroskop als Folgen der Elektrizitätsladung der Zellen beobachtet, setzen Potentialdifferenzen von mindestens 1½ Volt voraus.

4. Der einzige Sinn des Menschen, der elektrische Ströme erkennt und unterscheidet, der Geschmacksinn, beginnt bei 0,7 Volt negativ und 0,7 Volt positiv. Die dazwischenliegende Polarität im Gesamtbereich von 1,4 Volt kann die Zunge nicht durch den Geschmack unterscheiden. Diese von allen Geschmacksphysiologen hervorgehobene Tatsache (einige fanden noch einen weiteren Bereich) hat den Wert eines quantitativen Experiments.

5. Die Reduktionsarbeit der Pflanzenzelle, die Nahrungsstoffe aus Kohlensäure produzieren, würde, wenn sie elektrolytisch geschieht, mindestens 2,5 Volt erfordern.

6. Die statischen Potentialdifferenzen, die ich mit dem Quadranten-Elektrometer an pflanzlichen Pollenzellen maß, beliefen sich auf 2 Volt, jene der vegetativen Zellen, soweit erkennbar, auf dieselbe Größenordnung.

STATISCHE ELEKTRIZITÄT DER GESCHLECHTSZELLEN.

Als ich zum erstenmal mit dem statischen Quadranten-Elektrometer an die Untersuchung lebender Zellen heranging, nahm ich mir zuerst die großen Geschlechtszellen der Tulpe vor; bei dieser Pflanze waren wegen ihrer Größe die weiblichen sowohl wie die männlichen Zellen mit Händen zu greifen, ich hatte da am ehesten Hoffnung, die lebenden Ladungen charakteristisch festzustellen. Als ich nach den ersten Vorversuchen eine

konträre Elektrizitätsladung bei männlichen und weiblichen Zellen festgestellt zu haben glaubte, hielt ich meine Methode für gesichert. Erstens war die konträre Elektrizitätsladung beider Geschlechter eine alte Idee der Naturforscher, die nach Dubois Reymond schon ein paar hundert Jahre alt ist, zweitens hatte ich bei dem großen Interesse, das Naturforscher und Laien diesem Gebiete entgegenbringen, die Hoffnung, daß die theoretischen elektrostatischen Ideen rascher Verbreitung erlangen werden, wenn die Polarität der Geschlechter sich darauf zurückführen ließe.

Leider zeigte es sich bald, daß die atmosphärische Elektrizität oder eine andere Zufallsladung mich irregeführt haben mußte. Es gelang mir später nicht mehr, eine regelmäßige, beliebig wiederholbare, genau bestimmte Ladung elektrometrisch an makroskopischen Geweben festzustellen und ich richte jetzt mein Bemühen darauf, eine mikroskopische Elektrode zu konstruieren, um anstatt der Mischladung, die man beim Abtasten einer groben Gewebemasse erhält, die charakteristische arteigene Zell-Ladung gewisser Zellen festzustellen und womöglich zu messen.

Es mag auch sein, daß meine später behandelten Pflanzen bereits befruchtet waren, und dadurch ihre Ladung eingebüßt hatten.

Immerhin habe ich, wie ich glaube, mit Sicherheit festgestellt, daß lebender Pollenstaub der Tulpe (und auch anderer Pflanzen) mit mindestens 2 bis 3 Volt negativ geladen ist. Ich hatte auch Pollenstaub in Händen, der, wahrscheinlich durch Luftreibung, sich auf 10—15 Volt aufgeladen hatte.

Ferner ist es sicher, daß das einzelne Pollenkorn noch elektrisch differenziert ist. Zwischen statisch aufgeladenen Stanniolstreifen unter dem Mikroskop ordnen sich die Pollenkörner senkrecht zur Stanniol-Elektrode in Ketten, wobei bestimmte Flächen und Punkte der Körner von bestimmten Flächen und Punkten anderer Körner angezogen werden und zusammenhaften. Auf diese Weise entstehen vermutlich die sogenannten Pollinien der Blüten.

Bei den angewendeten großen Spannungen ordnen sich auch tote Partikel infolge des Funken-Ueberganges und der Luftbewe-

gung zu Reihen senkrecht der Elektrodenflächen, aber diese und die abgestorben zu vermutenden Pollenkörner haben nicht dic Verteilung der differenten Flächen.

Mit diesen Versuchen stimmen die Färbungen von lebenden und toten Spermatozoen gut überein. Nach Miescher*) und anderen färben sich die Köpfe der Spermatozoen total und stark basisch (kathodisch), die Schwänze hingegen werden durch saure Anilinfarben tingiert.

Mit Ausnahme der im Pflanzenteil zitierten Ausführungen von Auerbach findet sich in der neueren Literatur fast gar nichts über Lebendfärbungen der Geschlechtszellen vor. Die zahlreichen Bilder fixierter Zellen, die sehr für einen färberischen Kontrast in der Richtung negativer Spermakerne, positiver Ei-kerne sprechen, bei letzteren den Nukleolus, bei ersteren den Schwanzfaden ausgenommen, sind für mich nicht beweiskräftig, da beim Fixieren die ursprüngliche Zell-Ladung sich sehr oft umkehrt. Wenn aber Eizellen und Spermazellen nach genau denselben Fixationsmethoden behandelt werden und dabei ausnahmslos konträr chemisch zu reagieren scheinen, so ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, daß nicht ihr Chemismus, sondern ihre Elektrizitätsladungen konträrer Natur sind. Wo immer man Spermamasse oder Eizellen in größeren Mengen chemisch untersuchte, hat man nicht nur keinen Gegensatz, sondern die größte chemische Ähnlichkeit, in der Hauptmasse nahezu identische Stoffe gefunden. Die konträre Färbung ist also doch wohl eine Ausfällung der entgegengesetzten Elektrizitätsladungen.

Unter anderem habe ich auch sämtliche Bilder aus dem großen zehnbändigen „Handwörterbuch der Naturwissenschaften“ aus dem Fischer'schen Verlag auf diese Färbungen durchgesehen. Dieses Lexikon ist ein Monumentalwerk deutscher Gelehrsamkeit, wie es sicher keine andere Nation in annähernder Vollkommenheit herausbringen kann. Die führenden Forscher der Botanik, Physiologie, Biochemie, Zoologie usw. geben darin prachtvoll illustrierte Uebersichten über ihr Wissensgebiet. Aber es ist geradeso, als ob die Naturforscher der verschiedensten Gebiete sich dahin verabredet hätten, absolut nicht zu erwähnen,

*) Plasma und Zelle II/ 2 p. 442 (Heidenhain).

auf welche Weise die mikroskopischen Bilder erzeugt worden sind, ob aus lebendem oder fixiertem Material, oder, da es fast lauter Fixationsbilder sind, nach welcher Methode sie gefärbt wurden. Nur eine einzige Zeichnung kann ich hier reproduzieren, da es sich um eine Zwitterdrüse handelt, bei der beide Geschlechtskerne, auf einem Stück gewachsen, ganz sicher genau demselben Färbungsverfahren unterworfen worden sind.

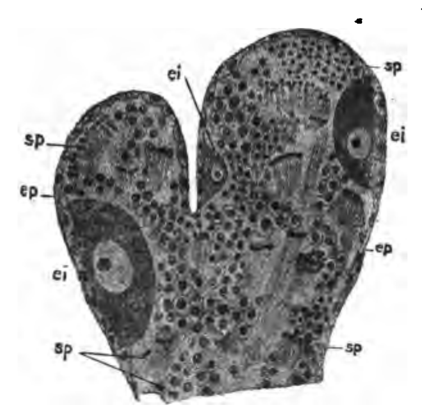


Fig. 14. Stück einer Zwitterdrüse von Helix. Im Durchschnitt. ei Ovozyten, ep Keimepithel, sp verschiedene Reifungsstadien von Spermatozoen. Nach Korschelt-Heider.

Man beachte, wie sich die Kerne der Spermatozoen in allen Zellen ganz entgegengesetzt färben, wie die Eizellen (den Nukleolus der letzteren ausgenommen) dieses Bild, dessen Verfasser ganz sicher nicht an einen elektrischen Gegensatz der Geschlechtskerne gedacht hatten, haben diesen Kontrast in einer Weise scharf herausgearbeitet, wie man sich ihn vom elektrohistologischen Standpunkte nicht besser wünschen kann.

Alle Bilder, die nach getrennten Objekten, aber mit identischer Fixation und Färbung gezeichnet werden, zeigen denselben Kontrast bei den verschiedensten Methoden.

VERSUCHSPLÄNE.

Durch meine vom Wissenschaftsbetrieb weit abliegende Berufstätigkeit bin ich verhindert, mich mit dem experimentellen Studium der Zellphysik so eingehend zu beschäftigen, wie ich es

wohl möchte. Ich erhalte auch jetzt im Kriege sehr schwer die neuen Apparate oder Umkonstruktionen, die sich aus der veränderten Methode ergeben.

Unter anderem habe ich einen Gefrierkasten für mikroskopische Beobachtungen bei Temperaturen unter Null bestellt, aber noch nicht geliefert erhalten. Mit diesem Apparat nach Prof. Molisch beabsichtige ich festzustellen, welche Teile der Zelle oder der Zellsäfte den niedrigsten Gefrierpunkt haben.

Gewöhnlich besteht zwischen dem Blut und dem in den Harnkanälchen nur wenige Millimeter entfernten Harn eine Differenz des Gefrierpunktes von zwei und mehr Celsiusgraden. Wenn nun eine gefrorene Niere unter dem Mikroskop langsam unter fortwährender Kontrolle aufgetaut wird, so wird sich beispielsweise ergeben, daß die aus dem Glomerulus austretende Flüssigkeit bei — 1.5° auftaut, hingegen die aus dem Epithel der gewundenen Harnkanälchen austretende Salzlösung konzentrierter ist und schon bei — 3° auftaut. Nach dieser ersten Feststellung und der Beobachtung, daß die Erreichung eines bestimmten Grades ein bestimmter Zellsaft zuerst flüssig wird und nur dieser allein, wird man diesen Nierenteil mit dem Mikrotom ganz in dünne Schnitte zerlegen und mit Wasser von dem möglichst genauen Auftaupunkt des konzentriertesten Gewebssaftes auslaugen. Dadurch erhält man dann ein bestimmtes Zellelement oder Zellsaftelement isoliert und kann es analysieren, zumindest aber seinen Aziditäts- oder Alkaleszenzgrad bestimmen. Von diesem Verfahren erhoffe ich mir den experimentellen Beweis, daß die Niere die Kationen und Anionen getrennt ausscheidet, also basische und saure Exkrete gesondert abliefert, aber es kann in der Hand eines geschickten und geduldigen Beobachters auch dazu dienen, genauere Analysen strittiger Zellteile durchzuführen, indem man entweder das Aufgetaute untersucht oder den zurückbleibenden Rest.

Ganz sicher wird sich auch nach diesem Verfahren mit voller Bestimmtheit ergeben, daß die sogenannten basophilen Zellelemente Basen sind, wie es die elektrochemische Methode fordert und nicht Säuren, wie es die herrschende rein chemische Ansicht ist.

Ferner beabsichtige ich, mit dem Quadranten-Elektrometer, aber auch mit den galvanischen Meßinstrumenten meine Färbungspräparate nachzuprüfen und womöglich Anhaltspunkte über die Spannung zu erhalten. Das soll in der Weise versucht werden, daß ein feiner Platindraht an den Objektträger herangeführt wird und dann der ganze Objekttisch des Mikroskops unter der Drahtspitze langsam hinweggeführt wird. Diese Versuche werden sehr mühevoll sein, sie werden bestenfalls nur sehr primitive Resultate geben können, auf unpolarisierbare Elektroden muß verzichtet werden, aber wenn es mir in vier oder fünf Fällen gelingt, die Uebereinstimmung des Gefälles mit den elektrochemischen Färbungen zu demonstrieren, so ist damit dann der exakteste Beweis geliefert, daß gewisse Färbungen elektrischen Ursprungs sind und man wird sich dann auf die bequemeren Färbungen verlassen können in jenen Fällen, in denen es nicht auf die Höhe der Spannung oder sonstige Maßgrößen ankommt.

Eine andere Versuchsreihe wird sich damit beschäftigen, die Dielektrizitätskonstanten der lebenden Zellteile dadurch zu untersuchen, daß sie in trockenem Zustande mit anderen Stoffen und Gasen von bekannter Dielektrizitätskonstante gerieben werden. Aus der elektrischen Ladung, die sie dabei annehmen, wird sich möglicherweise ihre eigene Isolierfähigkeit abschätzen lassen. Zumindest erwarte ich von diesem Versuchsplan, daß er die große Isolierfähigkeit des Protoplasmas erweist.

Mein Berlinerblau-Verfahren erscheint mir für die Zukunft ziemlich wertlos. Es sollte ausschließlich dazu dienen, die Beweise dafür zu liefern, daß die alten bequemeren und sicherer ausfallenden Tinktionen stark elektrisch beeinflußt sind, nicht mehr, vielleicht auch eine Uebereinstimmung mit Tastversuchen unter dem Mikroskop herstellen. Damit wäre dann seine Aufgabe beendet. Insbesondere im tierischen Material, das sich lebend nicht schneiden läßt und sehr ungleichmäßig eintrocknet, erzeugt es Niederschläge an solchen vertieften Stellen, an denen das Ferrozyan sich ansammelt und keinen Ausweg finden kann. Die Bilder sind infolgedessen sehr unsicher. Nach meiner Auffassung ist ein Zellteil, der sich mit Goldchlorid sofort

schwärzt, noch bevor das Präparat ganz tot ist, ebenso sicher kathodisch wie einer, der in Eisenchlorid und später zur Kontrolle im Ferrozyanbild seine Negativität erweist.

TABELLE DER ÜBEREINSTIMMUNG DER TINKTIONEN MIT DEN ELEKTROPHYSIOLOGISCHEN EXPERIMENTEN.

Im Laufe der Jahre, in denen mich der Zusammenhang zwischen den mikroskopischen Färbungen und den Elektrizitätsladungen der Zelle interessiert, habe ich in der elektrophysiologischen Literatur einerseits und den Färbungen der Histologen andererseits viele und viele Übereinstimmungen gefunden und keinen einzigen Fall, in der die mikroskopische Färbung den makroskopischen elektrischen Befunden widersprochen hätte.

Die allgemeinste Tatsache, die die Elektrophysiologen festgestellt haben, läßt sich etwa dahin zusammenfassen, daß sich lebendes Gewebe im allgemeinen elektronegativ gegen seine Umgebung und gegen totes oder degeneriertes Gewebe verhält. Die Physiologen, die unablässig von dem Bilde des vorausgesetzten „Stromes" ausgehen, drücken das so aus, daß sie sagen, im lebenden Objekt geht der Strom vom Querschnitt zum Längsschnitt, im ableitenden Bogen also umgekehrt. In dieser Form wird die in allen Fällen festgestellte Tatsache widergegeben, daß der Querschnitt elektronegativer ist als die natürliche Oberfläche der betreffenden Zellen.

Im Einzelnen ist folgendes festgestellt:

A. **Pflanze.**

	Elektrophysiologischer Befund	Histologische Beobachtung	Berlinerblau-Verfahren
Belichtetes Blatt	Querschnitt negativ 0,02 Volt nach Waller	Querschnitt nimmt lebend nur kathodische (basische oder reduzierende) Farbstoffe an	entschieden kathodisch
Stengel	Querschnitt negativ 0,01—0,08 Dn. nach Hermann	nimmt nur kathodische Farbstoffe lebend an	entschieden kathodisch
Kotyledonen bei der Keimung	weniger negativ gegen die übrige Pflanze nach Hanke	nimmt basische Farbstoffe schwächer auf als der Keimling	anscheinend schwächer kathodisch (das Verfahren gestattet keine sichere quantitative Beobachtung)
Pollenkorn	statisch — 2 Volt gegen Erde nach dem Verfasser	die äußere Membran (Exine) färbt sich nur mit basischen Farbstoffen	stark kathodische Ladung und anodische Abstoßung, außer mit Berlinerblau mit allen anderen untersuchten Metallsalzen.

B. Tiere.

	Elektrophysiologischer Befund	Histologische Beobachtung	Berlinerblau-Verfahren
Eiterzellen	nicht untersucht	Lebendfärbung mit basischen Farbstoffen	deutlich kathodisch mit anodischer Abstoßung
Nervenfaser	Querschnitt negativ	Lebendfärbung mit basischen Farbstoffen oder reduzierenden Mitteln (Gold-, Silbersalze)	deutlich kathodisch
Muskelfaser	„	„	„
Tierisches lebendes Gewebe im allgemeinen	„	„	„
Totes Gewebe z. B. Knorpelsubstanz	weniger negativ als lebende Zellen	färbt sich nicht mit Lebendfarbstoff	relativ anodisch gegenüber seiner kathodischen Umgebung
Elektrische Fische	Nervenendigung auf den elektrischen Platten oder anderes konform sich färberisch differenzierendes Gewebe 50 bis 80 Volt negativ	färbt sich mit Goldchlorid und auch sonst wie der Achsenzylinder des Nerven kathodisch	nicht untersucht

MITOSE, CHROMATIN, TIERISCHE GEWEBE.

Die mitotische Zellteilung ist ein Gebiet, auf dem man notgedrungen der statischen Elektrizität schon in Arbeiten der offiziellen Forschung eine gewisse Bedeutung zuerkannt hat. Die Strahlenspindeln des sich teilenden Kernes, die auffällige Abstoßung der Chromosomen, die sich fast niemals berühren, auch wenn noch so viele in der Äquatorialplatte der sich teilenden Spindel angehäuft sind, die deutliche und starke Fernwirkung, die das Zentriol ausübt, haben frühzeitig den Gedanken an statische Elektrizitätsladungen ausgelöst. Es wurde auch schon experimentell an die Frage heranzugehen versucht, infolge der großen Schwierigkeiten mikroelektrischer Experimente jedoch sind die Deutungen der Versuche anscheinend angezweifelt worden. Die Originalliteratur steht mir nicht zur Verfügung, ich kenne nur kurze Auszüge aus Bernsteins Handbuch und aus dem Artikel von Brüel im Handwörterbuch der Naturwissenschaften.

Fol hat zuerst den Gedanken ausgesprochen, daß die beiden Zytozentren elektrische Ladungen tragen, Hartog nimmt an, daß die beiden Pole der Spindel ungleichmäßige Ladungen besitzen (was meines Erachtens ganz sicher unzutreffend ist), während Gallardo findet, daß die beiden Zytozentren nur gleichnamig geladen sein können. Letzterer gibt an, daß bei geöffneter Kernmembran die Chromosomen kataphoretisch zur Anode gehen, weshalb er ihnen ein negatives Potential zuspricht. Mit dieser Beobachtung stimmt überein, daß sie sich mit kathodischen Farbstoffen färben, allerdings nach Fixierung, aber doch nach dem identischen Verfahren, nach dem alle sicheren Kathoden sich basisch ausfärben. Der chemische Histologe drückt das so aus, daß er sagt, sie beständen größtenteils aus Basichromatin.

Mit meinem eigenen Berlinerblau-Verfahren habe ich in den untersuchten Objekten auf Mitosen geachtet, aber nur eine einzige im Vegetationskegel einer Kamelie gefunden; diese zeigte kathodische Zentren, aber auch kathodische Strahlen. Ein anodisches Kontrollbild habe ich nicht gefunden. Mein Verfahren ist in seiner gegenwärtigen Form für Mitosen zu grob.

Von Roux wird bestritten, daß die Elektrizität die Spindelrichtungen beeinflussen kann. Es heißt darüber bei Brüel:

„Durch- und Umströmung mit verschiedenen Formen elektrischer Ströme haben keinen Einfluß auf die Spindelrichtung sich teilender Zellen ergeben.“ Aus diesen wenigen Worten „verschiedene Formen elektrischer Ströme“ ergibt sich anscheinend, daß Roux nur galvanische Ströme, nicht statische Ladungen angewandt hat, die allein in Betracht kommen konnten. Abgesehen von den mehrfach erörterten theoretischen Schwierigkeiten kann man nämlich die gewöhnlich niedrig gespannten galvanischen Ströme der Laboratorien absolut nicht in Zellen einleiten, die durch isolierende Membranen (wahrscheinlich mit Schutzladungen) geschützt sind. Um in solche Zellen oder gar ein Aggregat von Zellen, wie es gewöhnlich vorliegt, einen Strom von nur 1 Volt in das Innere der Zellen zu bringen, müßten an den Elektroden zumindest ein paar hundert Volt zur Verfügung stehen und ganz besondere Vorkehrungen getroffen werden, daß diese Spannungen sich nicht außerhalb der Zelle in die elektrolytischen Saftbahnen entladen. Ein solcher Versuch müßte also auch aus praktischen Gründen mit statischer Elektrizität unternommen werden.

Brüel scheint im ganzen den elektrischen Zellhypothesen ablehnend gegenüberzustehen, er erwähnt wohl, daß bei den histologischen Tinktionen elektrische Kräfte mitwirken könnten, aber in den besonderen Fällen findet er doch mehr die Einwände gegen diese Ideen richtig. So sagt er (X. Bd. p 864): „Elektrische Vorgänge seien beim mangelnden Elektrolytcharakter der Umgebung auszuschließen“. Ich bin solchen Argumenten auch mündlich schon hie und da begegnet. Darauf ist zu erwidern: die Umgebung fast aller Zellen hat in Zellsäften, in Vakuolen, die beweglichsten Ionen zur Verfügung, aber gerade das wäre der Haupteinwand dagegen, daß starke Ladungen nicht in den Zellen bestehen können. Starke Elektrizitätsladungen sind nicht an Elektrolyte geknüpft, sondern ganz im Gegenteil an das Vorhandensein starker Isolatoren. Ich suche in den Tierzellen bis jetzt vergeblich nach dem Dielektrikum, dem eine so große Isolierfähigkeit zu Gebote steht, wie ich sie in den lebenden Zellen als unentbehrlich ansehen muß.

Was die Streitfrage über gleichnamige oder ungleichnamige Spindelpole anbelangt, so möchte ich glauben, daß überhaupt die elektrischen Zellkräfte nicht einfach mit den alten Be-

zeichnungen unterschieden werden sollten, sondern daß dasjenige, was mit positiver oder negativer Polarität ausgedrückt werden soll, in der Zelle sich wahrscheinlich anders verhält als im Laboratorium. Beispielsweise könnte man sich vorstellen, daß in einer sich teilenden Zelle alle Teile negativ gegen die Erde als Nullpunkt geladen wären, aber in verschiedener Höhe, der Nukleolus — 2 Volt, das ruhende Basichromatin — 1,5 Volt, das Oxychromatin — 0,5 Volt, das Zentralkörperchen 1,2 Volt, so zwar, daß das Oxychromatin anodisch wäre gegenüber dem Zentriol, dieses, das gegen Oxychromatin Kathode wäre, immer noch Anode gegenüber Basichromatin und daß bei der Entladung einer dieser Substanzen das andere seine Polarität ihm gegenüber verändern müßte.

Oder anders ausgedrückt: man könnte sich vorstellen, daß ein neuer stark geladener Kern, der in eine Zelle eindringt — wie der sicher stark kathodische Spermakern in die unbefruchtete Eizelle, — die elektrische Polarität der anderen Zelle ihm gegenüber verändert, oder sogar das Vorzeichen umkehren läßt.

Nach der herrschenden Anschauung verschwindet das eigene Zytozentrum des unbefruchteten Eies beim Eindringen des Spermakerns. Diese Fernwirkung durch einen chemisch ziemlich genau untersuchten, chemisch neutralen Nukleoproteidstoff ist rein chemisch überhaupt nicht zu verstehen, allein stellen wir uns einen Augenblick auf diesen rein chemischen Standpunkt und beachten wir, was weiter geschieht, wenn das Ei nicht durch Sperma, sondern durch elektrisch geladene Ionen parthenogenetisch befruchtet wird. Dann erscheint das verschwunden gewesene eigene Zytozentrum des Eies wieder und funktioniert zunächst ganz normal, zeigt auch genau dieselben färberischen Reaktionen wie vorher. Es war also fortwährend da, es war in genau derselben komplizierten chemischen Zusammensetzung und in genau derselben morphologischen Konfiguration da. Weshalb hat es sich nicht normal gefärbt? Weshalb wählt es im Augenblick des Eindringens des chemisch neutralen Spermakerns nicht mehr die bekannten Farbstoffe aus den bekannten Lösungen spezifisch aus? Weshalb tut es das wieder, wenn der Spermakern ausbleibt und bestimmte charakteristische Ionenladungen an die Eizelle gelangen? Es kann nichts Anderes sein,

als daß der Spermakern irgendeine energetische Fernwirkung auf die Zelle ausübt. Nach dem bisherigen Stand unseren Kenntnisse kann diese Fernwirkung nur in zwei Energiearten bestehen. Entweder der Spermakern bringt Ladungen mit, die Strahlen aussenden und dadurch statische Entladungen herbeiführen, oder der männliche Geschlechtskern bringt eine Elektrizitätsladung mit, die sich gegen die Zelle entlädt, oder es geschieht beides zugleich.

Man wird dem Problem, wie ich glaube, am ehesten experimentell nahekommen, wenn man versuchen wird, solche färberische Reaktionen, die sich an gröberen Objekten mit der Berlinerblau-Kontrolle oder einer ähnlichen Metall-Elektrolyse als sichere anodische und kathodische Reaktionen erwiesen haben, also etwa mit Goldchlorid (in den ersten Minuten), Silbernitrat (ebenso) einerseits kathodisch oder mit Eosin, Orange, anodisch möglichst noch lebensfrische Gefrierschnitte von Mitosen zu tingieren versuchen wird. Es ist bekannt, daß lebende unfixierte Zellen keine sauren Farbstoffe annehmen, sie werden auch sicher niemals unfixiert in innere Zellteile gelangen, ein geduldiger und mit der Materie vertrauter Experimentator wird aber doch sicher ermitteln können, wohin die Tendenz der einzelnen Zellteile im lebenden Teilungskern zielt, wenn er öfter glückliche Schnitte versucht.

Oder man wird chlorhungrig gemachte Gewebe in Schnitten mit Jodkalium behandeln, dieses antrocknen lassen und dann die anodischen Jodpunkte mit Blei oder mit Stärke ausfärben.

Ganz gewiß ist es ein Fehler, daß man seit fast einem Menschenalter dem Problem der Lebendfärbung von Mitosen-Schnitten nicht mehr energisch und ausdauernd nachgegangen ist. Wer mit der heutigen Technik diesen Gegenstand in Angriff nehmen wird, hat sehr viel Aussicht, das schwierige Problem einen großen Schritt vorwärts zu bringen.

DIE LÄNGSQUERSCHNITT-ELEKTRIZITÄT.

Bei meinen Versuchen mit der im Pflanzenteil entwickelten Berlinerblau-Methode auf Kathoden und Anoden habe ich naturgemäß auf den sogenannten Strom der Querschnitte gegenüber den Längsschnitten geachtet. Im allgemeinen sind

die tierischen Objekte für ein solches Verfahren, das das Labilste der Zellenergetik festlegen soll, nicht günstig. Noch so frische tierische Objekte sind, einmal der regelmäßigen Atmung und Zirkulation entzogen, nicht mehr als normal geladen zu betrachten. Außerdem besteht der bekannte Übelstand, daß lebende Tierpräparate sich nicht schneiden lassen, mazerierte aber ganz undeutbare Niederschläge erzeugen. Es ist ja klar für den Anhänger der elektrostatischen Ladungshypothese, daß Tiergewebe beim Mazerieren auf dem Objekt durchsichtige elektrisch geladene Kolloidgallerten verstreuen müssen, die elektrolytisch wirken und Niederschläge erzeugen müssen. Es ist mir aber doch gelungen, auch einige tierische Kontrastbilder zu erzeugen, bei denen das Anodenbild ein Negativ des Kathodenbildes ist.

Ich unterwarf Knorpel von Tauben und von Fröschen meinem Verfahren. Die Knorpelgrundmasse ergab sich anodisch blau, kathodisch farblos auf blauem Grunde. Dieses Resultat ist im Einklang mit dem allgemeinen Grundgesetz, daß die lebenden Gewebe negativ (kathodisch) reagieren gegenüber nicht mehr lebendem, nicht protoplasmatischen Gewebe, ein Gesetz, das sich auch an den Pflanzen gezeigt hat.

Ferner ist die Färbung im Einklang mit den Resultaten von Unnas Rougalitmethode auf „Sauerstofforte“, bei denen die Knorpelgrundmasse blau hervortrat.

Ich versuchte auch Nerven und Muskeln und Objekte, die Beides zeigten. Beide Gewebearten sind unzweifelhaft kathodisch, aber der Nerv nicht offenkundig stärker als der Muskel, wie ich es eigentlich erwartet hatte. Wenn der Nerv eine stärkere Ladung hat, was noch immer nicht ausgeschlossen ist, so hätte er sie dann gegenüber seiner eigenen Tigroidsubstanz nicht gegen den Muskel.

Sehr deutlich und unbezweifelbar tritt an allen Präparaten. nicht nur an den tierischen, die Tendenz des sogenannten Längs-Querschnitt-Stromes hervor, weit deutlicher als alles Andere. Gleichgültig, ob man Muskeln, Nerven, Nägel, Hautstücke, Pflanzenstengel, Blätter, Blütenteile auf dem Objektträger hat, immer sieht man schon mit freiem Auge den sogenannten Querschnitt, in Wahrheit die angeschnittenen geöffneten Zellen gegenüber den natürlichen Zelloberflächen kathodisch stark blau gefärbt. Es ist natürlich gleichgültig, ob es sich um wirkliche Querschnitte han-

delt, wie bei den meisten fibrillär strukturierten Geweben oder um Flächenschnitte, Längsschnitte. Maßgebend für die stärkere Bläung ist das Anschneiden des Zellinneren. Auf Muskelpräparaten vom Frosch beispielsweise, bei denen einzelne Fibrillen von Messer angeschnitten sind, treten solche Fibrillen auch auf Längsschnitten stärker gebläut im Kathodenbild hervor.

Ebenso bei der Sklera des Auges, die sich ebenfalls lebend schneiden läßt und kathodisch starke Bläuung, anodisch starke Abstoßung des Ferrozyans zeigt. Die Hornhaut des Auges liefert keine Bilder, die eine deutliche Polarität zeigen, ebenso geben Knochen, die sich lebend schneiden lassen, undeutliche Niederschläge.

Solche Gewebe, die aus weichen Zellen und sehr harten Einschlüssen bestehen, krümmen sich beim Antrocknen und in den entstehenden Mulden findet das Reagens, das abgestoßen wird, keinen Ausweg und erzeugt Niederschläge mit dem zweiten Reagens.

Ferner habe ich Flächenschnitte von der Haut des Fingers, Querschnitte und Flächenschnitte von lebender Nagelsubstanz, von Haaren und dergleichen gemacht. Es ließ sich nur eine allgemeine, nicht sehr starke Kathodizität und eine schwache anodische Abstoßung erkennen, ferner die bekannte Negativität des Querschnittes, aber keine Zellpolaritäten.

Von einem Eiterpräparat, das mit den Berlinerblau-Reagentien koagulierte, erhielt ich trotzdem ein hübsches Kontrastbild mit kathodischer Anziehung und anodischer Abstoßung.

DIE ELEKTRIZITÄT IM VERDAUUNGSKANAL.

Seit 20 Jahren vertrete ich die Vermutung, daß der Inhalt des Verdauungskanals elektrolytisch zersetzt wird, daß in den Fundusdrüsen des Magens der Sitz einer positiven Polarität ist, in den Drüsen des Pankreas (in geringerem Maße auch in der Leber und in den Darmdrüsen) der Sitz negativer Polaritäten. Seither habe ich aus dem großen Buche von Hamburger und zahlreichen anderen neueren Schriften entnommen, daß diese Idee heute nicht mehr so absonderlich ist wie sie 1899 erschien.

Nach allem, was ich seither an Daten über Lebendfärbungen und dergleichen gesammelt habe, ist es für mich mehr und mehr zur unumstößlichen Gewißheit geworden, daß das Pankreas ein Hauptsitz der Kathodizität ist und daß dies sicher eine Hauptcharakteristik seines Wesens und seiner Zweckbestimmung ist. (Meine eigenen Untersuchungen haben bisher keinen neuen Beleg dafür liefern können, weil ich mit meiner groben Methode bisher mit feinen Gefrierschnitten überhaupt nicht zurechtkomme.)

Am sinnfälligsten tritt in den mir zugänglichen Publikationen die Elektronegativität in Mac Callums mehrfach zitierter Arbeit über die Oberflächenspannung hervor. Der genannte Autor hat die Drüse in voller Lebenstätigkeit gefrieren lassen und an dünnen Gefrierschnitten das Kalium mikrochemisch ausgefärbt, noch bevor die Zelle beim Absterben Zeit hatte, ihre Potentiale abzuschwächen und das Kalium in der Zelle wieder gleichmäßiger zu verteilen.

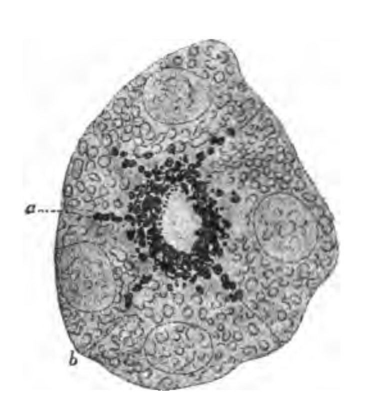


Fig. 15.

Hier folgt sein Querschnitt eines Azinus des Pankreas von Meerschweinchen, das Oberflächenkondensierung von Kalium auf dem Lumenrande der Zellen zeigt. (Vergrößerung 1380.)

Die elektrophysiologischen Untersuchungen von Biedermann und Bohlen an der Magenschleimhaut sind an anderer Stelle besprochen.

Wenn man versucht, unter den öfter wiederholten Vorbehalten aus den vorliegenden sehr lückenhaften Daten die elektrische Spannung zwischen Magenschleimhaut und Pankreasdrüse für die grobe makroskopische*) Ableitung abzuschätzen,

*) Der Ausdruck „makroskopische Ableitung“ soll besagen, daß die Magenwand, auch dort, wo sie einheitliche Drüsen besitzt, elektropolar ebensowenig eine einfache Einheit sein kann, wie sie histologisch einheitlich ist. Ihre Polarität gegenüber der Pankreasdrüse ist also das Endresultat einer innerlich verschiedenen aber in der Summe positiven Ladung gegenüber der Bauchspeicheldrüse.

so gelangt man dazu für die Spannung, die eventuell als Sekundärwirkung vorhanden sein muß, einen Wert von etwa

$$> 0{,}03 \text{ Volt}$$

abzuschätzen. Diese Berechnung gilt nur für den Minimalfall, daß diese Spannung kein lebenswichtiger Vorgang ist, sondern sich sekundär aus den Drüsenausscheidungen als Säure-Alkali-Kette erzeugt. Wenn der Mageninhalt elektrolytisch bearbeitet wird, wie ich annehme, so kann die elektromotorische Kraft zwischen den beiden Zellelementen natürlich beliebig hohe Werte annehmen.

Ich glaube, daß die galvanische Untersuchung der ganzen funktionierenden Magen- und Pankreasdrüse keine höheren Spannungen ergeben wird, als sie in fast allen Tier- und Pflanzengeweben gefunden wurden, aber es ist nicht unmöglich, daß der große Stoffumsatz und die große Fläche bei breiter Ableitung eine nicht unerhebliche Gesamt-Stromstärke ergeben wird, die sonst in physiologischen Objekten sehr klein ist.*)

Zu dem Kapitel „Magendarm-Ausscheidung" sei noch verzeichnet, daß die Fäzes normaler Tiere sehr chlorarm gefunden werden. Auch dies stimmt gut zu jener Ansicht, daß die Drüsen nicht neutralisieren, sondern oben die negativen und im unteren Verdauungskanal die positiven Ionen gleichsam absaugen. Leider habe ich in keinem Handbuch der physiologischen Chemie eine Elementar-Analyse der Fäzes gefunden, oder eine Angabe, aus der sich ihr Chlorgehalt berechnen ließe.

Schließlich mögen die interessanten Versuche Grützners**) mit verschieden gefärbten Futtern hier erwähnt werden. Diese Experimente, die von anderen Autoren bestätigt wurden, ergaben, daß das Innere des Mageninhaltes von der Säure

---

*) Im mikroskopischen Objekt jedoch und in der Zelle selber halte ich Spannungen für möglich und sogar für wahrscheinlich, die viel größer sind bis etwa zu einem Maximum von

$$< 3 \text{ Volt}$$

Bei dieser Spannung würde nämlich unter dem Drucke des Zellinneren (bei Atmosphärendruck schon bei 1,7 Volt) Wasser im freien Wasserstoff und freien Sauerstoff zersetzt werden, das als normale Erscheinung in größerem Maßstab bisher nicht beobachtet wurde.

Wir dürfen deshalb den Voltabfall im Verdauungskanal wie überhaupt in allen Tierzellen (elektrische Fische ausgenommen) zwischen 0,03 und 3 Volt schätzen, höchstwahrscheinlich nach der elektrolytischen Wirkung von Querschnitten auf chemische Substrate annähernd zwischen 1 und 2 Volt.

**) Pflügers Archiv, 106. Bd. zitiert nach Hammerstens Handbuch.

unberührt bleibt. Auch für die Flüssigkeit im Mageninhalt hat Grützner ein solches Verhalten gefunden. Dies wäre aber ganz unverständlich, wenn der Mageninhalt sich nicht unter einer elektrischen Spannung befinden würde. In dasselbe Kapitel gehört die Beobachtung Schierbecks,*) daß die Kurve der Kohlensäuretension des Magens denselben Verlauf hat wie die Kurve der Salzsäuretension, schließlich die Befunde der Pawlow-Schule, daß die Magenschleimhaut 0,74 Prozent Chlornatrium und Chlorkalium enthält, während der Sekretion 0,71 Prozent, also immer noch mehr als das chlorreichste Serum. Gleichzeitig bildet die Magenwand während der Verdauung Ammoniak. Diese makroskopischen Befunde, umgerechnet auf die spezifischen mikroskopischen Zellelemente, ergeben Schätzungen von Ionenkonzentrationen, die ohne starke elektromotorische Kräfte undenkbar sind.

Eine große Reihe von Versuchen sind unternommen worden, um die Darmresorption entsprechend den Ergebnissen der Kolloidchemie im wesentlichen als einen Quellungsvorgang der Darmschleimhaut zu erklären. Die Führung unter den Experimentatoren dieser Richtung besitzt der geistreiche Martin H. Fischer,**) der so ziemlich alle Stoffwechsel-Vorgänge und Krankheiten in den Bereich kolloidchemischer Betrachtung zieht, ein Verfahren, das bisweilen einseitig anmutet, immer aber durch seine kühne Konstruktion interessiert. Bei der Mitteilung der quantitativen Versuchsdaten der Darmresorption zeigt sich fast stets, daß Natrium, das in den Verdauungskanal nach der älteren Ansicht „sezerniert“ werden soll, vom Darm in das natriumreichere Blut verschwindet. Fischer begründet das mit einer kolloiden Quellungskraft der Darmschleimhaut. Für einen kurzen Versuch mag diese Erklärung ausreichen, es bleibt aber unverständlich, wie diese Quellungskraft sich fortwährend erneuern soll, wenn der Darm täglich 5 Liter Flüssigkeit ins Blut zu befördern hat. Martin H. Fischer stellt nun die Theorie auf, daß das venöse Blut der Darmschleimhaut auf der andern Seite Wasser entzieht, indem es den notwendigen Energiebedarf den Blutkörperchen entnimmt. Lassen wir einmal die Ansicht gelten,

---

*) Skandin. Archiv. für Physiol. nach demselben Handbuch.
**) Nach H. Bechholds „Die Kolloide in der Biologie und Medizin“, Dresden 1912.

daß der geschilderte Vorgang sich nach diesem einfachen Schema abwickelt, so muß doch hinzugefügt werden, daß hier eine rasche chemische Fernwirkung konstruiert wird, die ohne einen elektrischen Zwischenmechanismus zur Geltendmachung der Konzentrationsdifferenz des Wassers undenkbar ist. Wenigstens ist außerhalb der Zelle eine chemische Fernwirkung, sei es auch nur auf Millimeterdistanz, noch nie beobachtet worden. Die osmotischen oder kolloiden Kräfte, die man vielleicht als chemische Fernkräfte bezeichnen könnte, obzwar sie der elektrischen Vermittlung nicht entraten können, kommen in dem vorliegenden Fall wegen der Raschheit des Blutkreislaufes nicht in Betracht.

Solche Ueberlegungen weisen meines Erachtens zwingend darauf hin, die elektrostatischen Konstanten lebender Gewebe zu bestimmen. Auch die eingeschworenen Kolloidchemiker, die sonst alles auf ihre fundamentalen, neuen Gesetzmäßigkeiten zurückführen möchten, ein Verfahren, das zu tadeln mir am wenigsten anstehen würde, sehen sich manchmal genötigt, einen Augenblick bei den elektrischen Ladungen der Organismen zu verweilen, wenn keine andere Energie mehr aufzutreiben ist, die eine Fernwirkung erklärlich machen kann. So wird in dem mehrfach zitierten Buche Bechholds im Kapitel „der Organismus als kolloides System" (p. 262) mit zustimmenden Bemerkungen eine elektrostatische Hypothese eingeführt.

VERGLEICHENDE BEFUNDE BEI NERVENZELLEN UND NERVEN.

Ebenso wie bei den elektrisch so genau untersuchten Muskelzellen scheinen die elektrischen Messungen am groben Präparat beim Nerven mit den elektrochemisch angenommenen histochemischen Reaktionen übereinzustimmen. Ganz so wie der Muskel ist der Nerv überwiegend kathodisch (elektronegativ) beim Färben mit Methylenblau und Toluidinblau im Leben, beim Reduzieren von Silber- und Goldsalzen während des Absterbens. Die Suche nach Kalium ergibt bei Mac Callum das Kalium in einer vergleichsweise überraschend starken Konzentration auf denselben Punkten und in derselben Abschattierung wie das basische Methylenblau.

a) ist ein Gefrierschnitt-Präparat Mac Callums, b) ein frisches Präparat mit Methylenblau. Die beiden Bilder zeigen, daß die Kationen nicht nur an genau derselben Stelle ausfallen, sondern daß auch die Reagentien und die Kationen sich anscheinend auf denselben Wegen begegnen; die Reagentien dringen durch die Ranvierschen Einschnürungen ein. Dieser Umstand, daß Kationen und Anionen infolge der Flächenpotentiale des lebenden Gewebes nur auf bestimmten Punkten eines



Fig. 16.

a) nach Mac Callum Kaliumausfällung.



Fig. 17.

b) nach Kölliker Methylenblau.

Potentialgefälles in das Innere der Gewebe eindringen können, Punkte und Linien, die durch den Eingang der Nahrungskationen und -anionen im lebenden Gewebe vorgeschrieben sind, ist sicher auch eine Hauptursache, weshalb manche eingeschachtelte Zellteile z. B. die I-Scheibchen der quergestreiften Muskeln unter bestimmten, theoretisch zu erwartenden Fällen sich nicht in der vorausgesehenen Weise tingieren. So z. B. sind Mac Callums Kaliumfärbungen kein vollständiges Negativbild zu den anodischen Sauerstofforten und Reduktionsorten der Ganglienzelle nach Unnas Methode.

Die beiden untenstehenden Bilder betreffen morphologisch und physiologisch grundverschiedene Ganglienzellen. Man erkennt aber doch eine gewisse Gleichartigkeit der anodischen Polarisation des Tigroids, das bei a) negativ, bei b) positiv zutage tritt. Leider haben die beiden Autoren nicht gleichartige Ganglienzellen behandelt. Man erkennt aber doch, daß der Kern des Ganglions von Mac Callum wahrscheinlich nicht so einfach elektrisch undifferenziert ist, wie er sich im Kaliumbilde darstellt. Entweder gibt es schwächere Kathoden, die, umgeben von einem Anodenraum, kein so starkes Kation an sich herangelangen lassen, oder die Struktur der Zelle ist so eingerichtet, daß verschieden hohe Spannungen die verschiedenen Metallionen von



Fig. 18. a) Aus dem Ganglien Gasseri des Hundes, Kaliumbild nach Mac Callum.

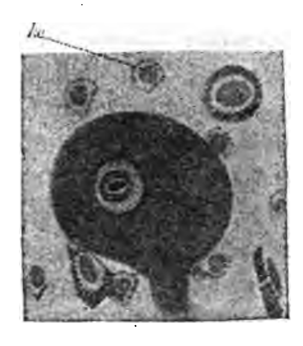


Fig. 19. b) Purkinjesche Zelle aus dem Kleinhirn des Kalbes, Sauerstofffärbung von Unna.

einander unterscheiden, so etwa wie man in der praktischen Galvanoplastik bestimmte Metallniederschläge aus Mischlösungen auf bestimmten Stellen erzeugt. Wenn der Organismus elektrolytische Spannungen zum Transport seiner Nahrungsstoffe benützt, so hat er sicher Einrichtungen, die verhindern, daß auf allen negativen Punkten bei der Ähnlichkeit des Chemismus der Körpersäfte dieselben Ionengattungen ausfallen.

Sämtliche anderen Färbungen an frischen Präparaten stimmen im Grundzug mit Mac Callums und mit Unnas Ausfällungen der elektrischen Potentialflächen, selbstverständlich auch der elektrophysiologische Versuch, der immer und überall den Querschnitt negativ zeigt gegen die Oberfläche.

Auf eine Bemerkung Mac Callums muß ein wenig ausführlicher eingegangen werden, weil sie, gleichsam an einem Schulbeispiel von dem öfter hier behandelten Grundirrtum der extremen Laboratoriums-Mikrochemie ausgeht. Der Autor, dem man so geistreiche und gründliche mikrochemische Untersuchungen verdankt, äußert gelegentlich der Beschreibung seiner Nerv-Muskel-Präparate, daß er an denselben Stellen, wo er das Kalium findet, sowohl beim Nerv als beim Muskel auch Chlor gefunden hat, das das Kalium offenbar als Chlorkalium binde.

Wie hat nun Mac Callum das Chlor analysiert? Er hat Silbernitrat auf die Gefrierschnitte gebracht und selbstverständlich an den negativsten Punkten, an den Kaliumpunkten bei nachfolgender Belichtung starke Schwärzung erhalten. Kein Elektrochemiker konnte im chlorfreiesten Präparat etwas anderes erwarten! Natürlich kann man im anorganischen Laboratorien mit Silbernitrat auf Chlorsilber prüfen, aber das ist doch ganz unmöglich in einem lebenden Gewebe, in dem jedes Galvanometer schon starke elektrische Spannungen anzeigt! Hätte Mac Callum Goldsalz genommen, dessen Chlorid löslich ist, so hätte er durch die Reduktionskraft der Kathodenpunkte an denselben Stellen die Schwärzung erhalten, wie ja die Gold-Bilder der Neurologen zeigen. Auf derartige Mikro-Analysen, die sicher statt der Chlororte gerade die entgegengesetzten chlorfreien Orte anzeigen, verfällt man beim extremen Chemismus, der die Laboratoriumsanalyse einfach auf lebendige Zellen überträgt!

In den Bemerkungen des amerikanischen Autors verbirgt sich noch ein anderer Irrtum, der im Unterbewußtsein in der Histochemie eine große Rolle spielt, wenn er auch nicht direkt ausgesprochen wird. Ein Histochemiker, der in einem Zellteil eine starke Konzentration von Kalium findet, sucht unwillkürlich in dem Gewebe gleich nach einem Element oder einem Säureradikal, das das Kalium fest „bindet", nämlich so bindet, daß von seinem Hauptcharakter als elektropositivstes Element womöglich nichts mehr übrig bleibt als ein Neutralsalz von recht harmlosem Charakter.

Nun darf man aber den Zweck und die Arbeitsweise der Zelle nicht so verkennen, daß man annimmt, daß die Zelle die kolossale Leistung fertigbringt, aus einem Gewebe mit ein

Fünftel Prozent Kaliumgehalt an bestimmten Flächen und Punkten vielleicht zwei oder drei Prozent Kalium zu konzentrieren und das übrige Gewebe kaliumfrei zu halten, ohne daß sie mit diesem Element, dem positivsten der im Körper vorhandenen Elemente, etwas bewirkt, was mit seiner Haupteigenschaft, seiner starken positiven Polarität, zusammenhängt. Wir kennen auch keinen physikalischen Mechanismus außer dem elektrischen, der auch nur im entferntesten imstande wäre, eine solche Konzentration eines Neutralsalzes mitten in einer stark verdünnten Lösung erst zu erzeugen und dann aufrecht zu erhalten. Wenn also im Nerv Elektrizitätspotentiale vorhanden sind und daran ist nach so unzähligen Befunden nicht zu zweifeln, so muß zwischen Elektrizitätspotentialgefälle und Kaliumverteilung ein naher Parallelismus bestehen, natürlich ebenso bei der Chlorverteilung.

Jeder Physiologe weiß, daß die einfachsten mikroskopischen Algen imstande sind, Kohlensäure in Sauerstoff und Kohle zu zerlegen, eine Kraftleistung, die übrigens außer im elektrischen Strom noch keinem Laboratoriumschemiker gelungen ist, nachzuahmen. Wenn aber einer die Annahme macht, eine Magendrüsenzelle könne den Magensaft so elektrolysieren, daß ein halbes Prozent Salzsäure entsteht, erscheint es beinahe phantastisch. Da aber jeder Tinktionsversuch an lebenden Zellen zeigt, daß auch farblose Neutralsalze von den Geweben deutlich distinkt aufgenommen, das heißt also zerlegt werden, so muß man das Gedankenbild der nahezu neutralen, lediglich von schwach sauren oder schwach basischen Proteiden erfüllten Zelle ausschalten und sich damit befreunden, daß die Zelle selbst Neutralsalze fortwährend zerlegt und neu verbindet, so wie es im großen der spezialisierte Stoffwechsel der höheren Tiere im Magendarmkanal und in den Exkretions- und Sekretionsdrüsen uns zeigt. Die Salzsäuredrüsen der Wirbeltiere oder die alkalischen Drüsen des Darmes geben aber kein richtiges Bild der starken elektrolytischen Kräfte der einzelnen Zelle. Bevor die mikroskopischen Sekrete unter unseren groben Händen zur Analyse gelangen, haben sie sich so stark mit Wasser und Zellsäften verdünnt, daß die volle Stärke ihrer Polarität nicht mehr nachweisbar ist.

Die Schwerfälligkeit und Hartnäckigkeit, mit der sich die

alte Idee erhält, daß man beispielsweise mit Silbernitrat Chlor im lebenden Gewebe aufsuchen könne, verleiten mich manchmal zu dem entgegengesetzten Extrem, in allen Zellreaktionen nur elektrolytische Vorgänge zu sehen. Die Darstellungsweise der Biochemiker, daß z. B. das Tier aus Kohlenstoffverbindungen und Sauerstoff Kohlensäure erzeugt, ist darnach angetan, zum scharfen Widerspruch herauszufordern. Viel richtiger und allgemeiner zutreffend erschiene es, zu generalisieren, daß das Tier kathodische Stoffe aufnimmt und sie überwiegend an anodische Elemente bindet, denn in geeigneten ungiftigen Kombinationen nehmen die Zellen ja auch an Stelle des Sauerstoffs aus dem Chlor der Chloride ihr anodisches Element oder aus dem Schwefel des Eiweiß und scheiden es in anodischen Radikalen aus. Ebenso konsumieren sie im Fett anstatt Kohlenstoff den ebenfalls kathodischen Wasserstoff und neutralisieren ihn zu Wasser. Innerhalb einer bestimmten engen Auswahl von Elementen, die nicht direkt giftig sind, kann das Chlor durch Jod oder Brom ersetzt werden, Kalium durch Natrium und Lithium. In erster Reihe maßgebend ist also nicht der chemische Spezialfall, sondern (natürlich innerhalb gewisser Einschränkungen) die Elektropolarität und die Wertigkeit des Elements. Die Wertigkeit des Elements ist aber nichts Anderes als die Zahl der Elektrizitätsladungen (Elektronen). Aber man braucht schließlich nicht so weit zu gehen, um zu erkennen, daß die Elektrohistologie der Zelle arg vernachlässigt worden ist.

DIE TINKTORIELLEN UND ELEKTROPHYSIOLOGISCHEN EXPERIMENTALBEFUNDE BEIM QUERGESTREIFTEN MUSKEL.

Von großem Interesse für die Annahme der elektrochemischen Zerlegung der mikroskopischen Farbflüssigkeiten ist natürlich ihr Verhalten im Muskel und Nerven, jenen beiden Gewebearten, die elektrisch am genauesten experimentell untersucht sind. Die grobe Uebereinstimmung zwischen dem elektrischen Versuch am makroskopischen Präparat und der histologischen Ausfärbung liegt auf der Hand. Der Muskel zeigt sich in seinem Querschnitt in allen Fällen stark elektronegativ (schon makroskopisch, wo er sich mit Gegenpolen mischt, bis zu 0,10

Volt), mikroskopisch wird das Innere immer basisch gefunden und stark reduzierend.

Der Hauptsitz der Basizität sind die anisotropen Schichten (Q) des quergestreiften Muskels, die die Hauptmasse des Gewebes ausmachen, obzwar Unna in seinen Reduktionsbildern stärkere Vergrößerungen von Muskeln nicht beschreibt oder zeichnet, so darf man wohl annehmen, daß auch bei ihm die Q-Scheiben reduzierend gefunden wurden, da die Reduktionsbilder auch sonst mit den Basenbildern (ihrer gleichsinnigen Elektronegativität zufolge) konform gehen.

Darnach besteht die quergestreifte Muskelfaser aus den überwiegenden elektronegativen doppelt brechenden Q-Schichten

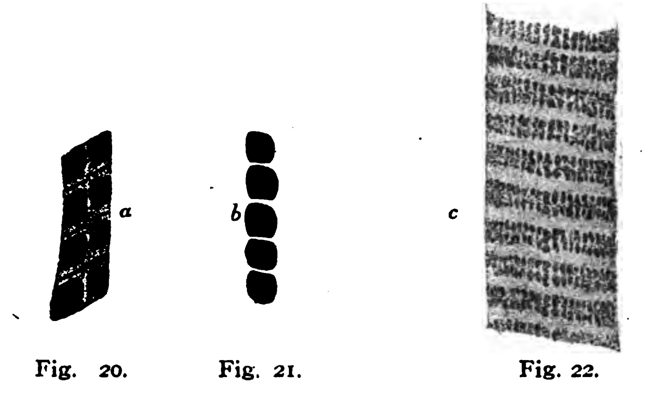


Fig. 20. Fig. 21. Fig. 22.

und aus den vorwiegend elektropositiven nahezu einfach brechenden J-Schichten, welche aber immer noch differente Unterabteilungen erkennen lassen und sicher keine einfachen Bestandteile sind.

In vollkommener Uebereinstimmung damit zeichnet Mac Callum in seinen Lokalisationen des Kaliums in Gefrierschnitten die basischen, reduzierenden, doppelt brechenden Q-Schichten schwarz von Kalium und läßt sogar auf einem stark vergrößerten und nicht kontrahierten Bild (a) deutlich die Zwischenschicht Z erkennen, die sich mit Teerfarben ebenfalls basisch-reduzierend zu färben pflegt. Hier die Bilder Mac Callums vom Flügelmuskel der Kotfliege a) nicht kontrahiert, b) kontrahiert, c) Uebersichtsbild.

Jeder Histologe wird in den vorstehenden Abbildungen das ihm vertraute Bild der basischen Färbung wiedererkennen; viel

bestechender noch als die Uebereinstimmung mit der basischen Ausfällung ist die Uebereinstimmung der Inversionsfärbung, falls mit einem sauren Farbstoff zuerst gefärbt wird. Was elektrochemisch zu erwarten ist, wenn mit einer basischen Farbe zuerst tingiert wird, ist ja klar: Die elektronegativen Punkte fällen die basische Farbe auf sich aus, entladen sich dadurch selber und bringen auf der Oberfläche der basischen Färbung wahrscheinlich auch eine positive Influenzladung oder Sekundärladung zum Vorschein. Auch entladen sich gleichzeitig die positiven Pole farblos gegen die Ionen der wässerigen Lösung, die wieder in Lösung gehen. Eine nachher eingeführte saure Farbe wird die früher stark positiven Punkte kaum mehr als diffus färben.

Anders bei der Doppelfärbung, zuerst mit saurer Farbe. Die nachher eingeführte basische Farbe findet schon die elektronegativen Punkte entladen, kann diese nur mehr diffus färben und wird eher eine Affinität zu der elektropositiven Farbaufladung der Anoden zeigen, aber wahrscheinlich ein Bild hervorbringen, das als inverses desjenigen Bildes sich darstellen wird, wenn die entgegengesetzte Farbe zuerst an das Präparat gebracht wurde.

Die erste Voraussetzung der inversen Färbung im elektrochemischen Sinne ist nun die, daß die beiden Elektrizitätspole innerhalb der Grenzen des Sichtbarkeitsbereiches der Mikroskope darzustellen sind. Nach den prachtvollen Zeichnungen M. Heidenhains in seinem Buche „Plasma und Zelle" I. 2*) scheint nun beim Muskel diese Voraussetzung vorzuliegen.

Heidenhain erklärt seine Inversionsbilder am Muskel wie folgt: „Die Inversionsbilder sind regressive Färbungen (d. h. solche, die durch nachträgliches Auswässern hergestellt werden), welche darauf beruhen, daß zuerst ein hochmolekularer saurer Anilinfarbstoff vorausgeschickt wird (z. B. Thiazinrot, Molekulargewicht über 800), worauf man mit einem basischen Körper nachfärbt (z. B. Toluidinblau). Unter diesen Umständen entfärben sich bei der Auswaschung zunächst wenigstens die dichteren Teile rascher, so daß eine Umkehrung des gewöhnlichen Farbenbildes statthat.. Die Theorie dieser Färbungen (Heidenhains eigene Worte) ist keineswegs völlig klar,

*) P. 626.

doch glaube ich, daß nach den mitgeteilten Erfahrungen die dichteren Teile (Q) im allgemeinen sich schneller entfärben. Dies kann wohl eigentlich nur daran liegen, daß die weniger dichten Teile (J) infolge ihrer größeren Porenweite jene hochmolekularen Farbstoffe überhaupt sehr viel besser, d. h. schneller und in bedeutend größerer Menge aufnehmen. Der an zweiter Stelle nachgeschickte basische Farbstoff kuppelt sich ferner mit der vorangegangenen sauren Farbe zu einer äußerst hochmolekularen Neutralfarbe. Es ist sehr wohl möglich, daß infolge der Vergrößerung des Molekularvolumens die Farbstoffteile dort, wo sie in erheblicher Menge eingedrungen sind, in sehr fester Weise verankert werden . . ."

Man sieht, Heidenhain findet seine Erklärung selbst unbefriedigend, er benötigt eine ganze Reihe weithergeholter neuer Annahmen, um die Umkehrung des Farbenbildes zu deuten, die der Elektrochemiker zwangläufig erwarten muß. Es ist ganz sicher, daß selbst ein so kleines Molekül wie Jodkalium sich im Muskel anodisch je nach der Reihenfolge der Färbung auf die einfach brechende oder doppelt brechende Substanz abladen muß, worauf man sicher mit Stärke das kleine Jodion an denselben Stellen finden wird wie das hochmolekulare Thiazinrot. Die Elektronegativität, — nicht die Größe seines Moleküls, — ist die Ursache seiner Anziehung von der elektropositiven Potentialfläche.

Es sei noch hinzugefügt, daß Mac Callums genauere Beschreibung der Verteilung des Kaliums in den Q-Scheibchen genau mit den Schattierungen der Basizität in Heidenhains Zeichnungen übereinstimmt.

Die einzige nicht vollkommene Uebereinstimmung zeigt sich in einem Nebenpunkt der Unna-Färbung der Sauerstofforte, daß diese nämlich nach den vorliegenden Zeichnungen bis auf eine ganz schwache diffuse Bläuung gar keine Anode im Muskel demonstriert, während sie nach dem elektrochemischen Prinzip in allen quergestreiften Muskeln vorhanden sein müßten. Unna hat jedoch überhaupt keine stärkeren Vergrößerungen abgebildet, bei denen sich eine differente Färbung der J-Streifen hätte erwarten lassen. Nach seiner Beschreibung sind die Muskelfibrillen überhaupt farblos geblieben. Es mag sein, daß seine Sauerstoffmethode sehr feine Linien und Punkte überhaupt nicht

gut darstellen kann bei dem Umstande, daß der Luftsauerstoff schon imstande ist, Leukomethylenblau wieder zu oxydieren und zu bläuen und Luftabschluß bei Anwesenheit der reduzierenden Körpersäfte die Bläuung wieder rückgängig macht. Bis einmal festgestellt sein wird, was sicher bald sich erweisen wird, daß die Färbung anderer Anionen, z. B. des Jodions, des Ferrozyanwasserstoffions oder anderer dieselben Orte stabiler herausarbeitet, so wird man sicher die I-Streifen der Muskeln anodisch finden.

Ich habe natürlich auch Muskeln mit meinem Berlinerblau-Verfahren gefärbt, welches jedoch für so feine Elemente zu grob ist. Es schien mir im Kathodenbild der anisotrope Streifen dunkler zu sein. Das kann jedoch durch die diffuse Blaufärbung auf der einen Seite und die größere Dichte und Undurchsichtigkeit des Q-Streifens vorgetäuscht worden sein. Ein deutliches Anodenbild ist mir nicht geglückt. Sicher ist nur, daß der Querschnitt, oder überhaupt eine angeschnittene Faser, dunkler blau an der Kathode ist wie die natürliche Oberfläche. Der Schnitt in das Zellinnere ist also negativ wie im elektrophysiologischen Experiment unter freiem Auge.

UNNAS SAUERSTOFFORTE.

Unnas Schriften sind für den, der sich für die elektrische Histologie der Zelle interessiert, eine Fundgrube von hochinteressanten Beobachtungen. Alles, was in den letzten Jahren über Färbungen lebender Zellen veröffentlicht wurde, auch die bedeutsamen Arbeiten der Gruppe Schulemann, Evans und Wilborn, die rein experimentell zu einer elektrischen Hypothese der Zellfärbung gelangt sind, wird in den Schatten gestellt durch Unnas Methode der Oxydations- und Reduktionsfärbung, die einen geistreichen Gedanken technisch in bewunderswerter Weise gelöst hat. Auch alle sonstigen Vitalfärbungen seit Ehrlich sind, wenn sie nicht direkt von Zellelektroden hervorgerufen wurden, sicher von ihnen sehr stark beeinflußt. Wenn in einer Zelle noch so starke chemische Affinitäten vorhanden sind, und starke, rein chemische Affinitäten nach dem Vorbilde der Laboratoriumschemie wie etwa zwischen Metall und starken Säuren, oder zwischen Schwefel und Salpeter sind

in lebenden Zellen niemals vermutet worden, sondern größtenteils Stoffe, die halb sauer, halb basisch sind, nur selten Reduktionsmittel und sehr selten starke Oxydationsmittel, — also selbst wenn nicht die sogenannten chemischen Affinitäten der lebenden Zellen eigentlich Phantasiegebilde wären, denen jegliche tatsächliche oder experimentelle Grundlage fehlt, so ist es doch für den Kenner der Materie ganz unbezweifelbar, daß eine elektrische Potentialdifferenz von einem Zehntel Volt, wie sie sicher schon in Tausende Zellen gemessen worden ist, imstande ist, die unbeträchtlichen „chemischen Affinitäten" der Zelle in ihr Gegenteil umzukehren, ein basisches Eiweiß sauer reagieren zu lassen und ein saueres Eiweiß basisch.

Man ist also berechtigt, zunächst einmal in Gedanken den Versuch zu machen, das große Material der Vitalfärbungen auf seine Brauchbarkeit zum Aufbau einer Elektrohistologie zu durchmustern. Ich habe seit mehreren Jahren diese Idee in der mir zugänglichen Literatur verfolgt, bin aber nicht zu befriedigenden Schlußfolgerungen gelangt. Unter anderem herrscht unter den Biochemikern, die natürlich niemals ihre Farbstoffe elektrolysieren, noch lange keine Einstimmigkeit über die Basizität oder Azidität ihrer Reagentien, und dort, wo sie einstimmig ist, kann man sie noch immer nicht als zutreffend bezeichnen. So z. B. stellt Goldmann*) sein Pyrrholblau, dem er prachtvolle Vitalfärbungen verdankt, als basischen Farbstoff vor, (der also elektrisch Kathoden, negative Punkte, ausfärben müßte); er wird aber heute überwiegend als saurer Farbstoff (Anodenreagens) betrachtet, da er ganz genau dieselben Zellelemente auswählt wie Trypanblau, Isaminblau, die sicher sauer sind und so färbt wie Ruß, chinesische Tusche, Bakterienleiber, negative Metallsole und andere zuverlässig zur Anode wandernde Kolloide. Nach vieler Ueberlegung sind mir sogar ernste Zweifel aufgestiegen, ob nicht selbst Methylenblau, das als typisch basischer Farbkörper gilt, unter Umständen auch anodisch ausfärben kann.**)

Abgesehen also von dem amphoteren Charakter der ungiftigen kolloiden Farben haftet noch ein anderer Nachteil den vita-

*) Die äußere und innere Sekretion des gesunden Organismus im Lichte der „vitalen Färbung", Tübingen Laupp, 1909.

**) Methylenblau verhält sich bei der Elektrolyse deutlich kathodisch

len Färbungen durch intravenöse Injektionen an, nämlich die Einseitigkeit des Angriffsortes. Für den Bekenner der Lehre von den elektrostatischen Spannungen der Zellen und Zellgruppen ist es klar, daß es einen großen Unterschied ausmacht, ob man zu den Zellen von der Blutseite her, oder von der Lymphseite her, oder vom Verdauungskanal aus, oder vom Harnleiter aus den Farbstoff zu dem Gewebe bringt. Schon die bisherigen Beobachtungen haben ergeben, daß Farbstoffe, die den Verdauungskanal unverändert passieren, von dort aus gewisse Zellen nicht färben, vom Blut aus aber deutlich Darmzellen färben. Für den Elektrostatiker ist das selbstverständlich. Die Potentialflächen, die statische Ladungen umgeben, sind gesetzmäßig durch Influenz entgegengesetzt elektrisch geladen, sie bilden in chemischer Beziehung unter Umständen eine Schutzwehr gegen die Anziehung der gewissen Atomgruppen, die nur durch Entladungen unterbrochen wird und die Ausfärbungen nur von einer bestimmten Seite aus zuläßt. Es muß auch daran gedacht werden, daß das Lamellenepithel der Tubuli contorti der Niere beispielsweise aus Anoden und Kathodenseiten bestehen kann oder daß die Lamellen unten an der Basis gegen die Gefäße zu anodisch und oben gegen das Lumen der Kanäle kathodisch sein dürften. Bei dem gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse von den elektrischen Zellkräften läßt sich kaum eine feste Vorstellung von der Verteilung der Polaritäten machen, es läßt sich nur bestimmt sagen, daß die elektrischen Spannungen mit irgend einem Verschluß- oder Sparmechanismus versehen sein müssen, damit sie sich nicht gleich auf jeden beliebigen ihnen angebotenen Atomkomplex sofort entladen. Nach einem Bild von Ehrlich in bezug auf die Sauerstoffzufuhr, daß diese wie bei einem Sparherd mit Hemmungen arbeiten müsse, läßt sich dasselbe für die Ökonomie des Verbrauches der Körperelektrizität voraussetzen.

Die vitalen Färbungen, so interessant sie auch gegenüber den alten rein optischen Methoden waren, haben übereinstimmend den Nachteil, daß sie die natürlichen Sicherungen der Bioelektrizität nicht aufschließen konnten. Demgegenüber sind nun Unnas Methoden ein fundamentaler Fortschritt. Indem dieser die lebenden Gewebe nach der Gefriermethode behandelte und durch Schnitte die lebenden Zellen öffnete, dann erst färbte und schließlich durch verschiedene Reduktionsmittel Inversionen

seiner Oxydationsorte hervorbrachte, hat er eine Histologie der objektiven Elektrizitätspole begründet, eine Histologie jener Punkte, die nicht nur von der Blutseite oder der Lymphseite her elektropolar sind, sondern aller Orte, die sich gegen neutrale Reagentien positiv oder negativ abheben. Dieser Umstand ist es, der seine Bilder so stark abhebt gegen alle Färbungen, die die älteren Methoden erzeugt haben.

Hie und da färbt er wohl auch nicht ganz frische Zellen, oder bei Reduktionsfärbungen Alkohol-Zelloidin-Schnitte, aber erst nachdem er sich davon überzeugt hatte, daß die lebendfrischen Schnitte dieselben Zellelemente herausheben. Die Tafeln in seinem Hauptwerk der letzten Jahre „Die Sauerstofforte und Reduktionsorte“ (eine histochemische Studie von P. G. Unna*) geben eine packende Übersicht über dieses hochinteressante Gebiet. An Bildern von normalen und vergifteten Rattenlippen, an Fußsohlenhaut von Menschen, an Kopfhaut, an Mausnase, an Kaninchenlunge, Kaninchenniere, an roten und weißen Blutkörperchen, endlich an Ganglienzellen wird an positiven und negativen Bildern die Verteilung des Sauerstoffes in den lebenden Zellen aufgezeigt, die, wie bestimmt anzunehmen ist, mit der Verteilung der positiven Pole identisch ist.

Das gewöhnliche Hautbild wird beherrscht von einer Zellgattung, die die Kapillargefäße, die größeren Nervenstämme, die Haarscheiden begleitet und durch ihre tiefdunkle Färbung auffällt. Unna bezeichnet diese Zellen als Mastzellen, er faßt ihre Funktion als Sauerstoff-Aktivatoren und -Ueberträger auf. Darnach hätten sie den Sauerstoff den Blutkapillaren zu entnehmen und ihn je nach dem eintretenden Bedarf den sauerstoffhungrigen Geweben zur Verfügung zu stellen. Wie dem auch immer sei, ich wage nicht eine spezielle Annahme darüber zu machen — aus den Versuchen, die vielfach nachgeprüft wurden, geht zur Evidenz hervor, daß das tierische Gewebe, das man sich im allgemeinen aus lauter leichtverbrennlichen, reduzierenden Stoffen zusammengesetzt denkt, eine große Zahl von Punkten besitzt, die auf reduziertes Methylenblau bei Luftabschluß eine oxydierende Wirkung ausüben. Diese wichtige und neue Erkenntnis, die eigentlich die extremen Nur-Chemiker noch mehr überraschen

*) Archiv für mikroskop. Anatomie, Bd. 87, Abt. I, 1915, p. 97.

müßte als den Elektrochemiker, ist ebenso wichtig wie die seinerzeitige Entdeckung, daß die Pflanzen in gewissen Zellen und bei Nacht Sauerstoff veratmen und Kohlensäure produzieren. Nicht nur der Pflanzenkörper kann Kohlenstoffverbindungen verbrennen, die Tiere können aus organischen Verbindungen auch Sauerstoff erzeugen. (Man hatte früher schon gelegentlich freien Sauerstoff im Parotisspeichel und im Harn entdeckt und daran die abenteuerlichsten chemischen Hypothesen geknüpft.)

Unna spricht davon, daß er Sauerstofforte nur an Säureorten aufgefunden hat, aber nicht alle Säureorte seien Sauerstofforte. Wenn dies vollkommen zutreffend wäre, so wäre dies die brillanteste experimentelle Bestätigung der elektrochemischen Tinktionshypothese, denn da bei der Elektrolyse am positiven Pol immer der ganze Säurerest erscheint (die Anionen SO_4'', NO_3', CO_3'', die im Wasser sofort in Säure-Anhydrid und freien Sauerstoff zerfallen) so begreift es sich leicht, daß die beiden negativen Molekülteile, Säure und Sauerstoff immer an denselben Punkten erscheinen und daß der Sauerstoff mitten in den reduzierenden Körpersäften nicht erscheinen kann, da er sofort zu inneren Oxydationen verbraucht wird. Leider nur sind die Säureorte und die Sauerstofforte nicht immer beisammen, denn Unna bezeichnet nach den herrschenden Anschauungen als Säureorte jene, die sich mit basischen Farben, z. B. Methylenblau färben, während der biologische Elektro-Chemiker im Gegenteil davon überzeugt sein muß, daß sich die lebende Zelle den normalen Säften gegenüber genau so verhält wie gegenüber Teerfarben und auf ihren Säureorten saure Atomgruppen, auf den basischen Orten Basen aufspeichert.

In dem vorliegenden praktischen Fall liegt die elektrische Unstimmigkeit darin, daß die am stärksten ins Auge fallenden Sauerstofforte Unnas, die Mastzellen sowohl Methylenblau speichern als reduziertes Methylenblau oxydieren. Beides sind, wenn Methylenblau sich nicht in Ausnahmefällen auch sauer verhalten kann, elektrisch entgegengesetzte Ausfällungen. Entweder also Methylenblau ist keine so unbedingte Base oder die Mastzellen haben jenseits der Grenze der Sichtbarkeit entgegengesetzt gefärbte Zellteile. In den sonstigen Bildern Unnas besteht zwischen Methylenblau und Rongalit-Methylenblau der

vom elektrochemischen Gesichtspunkt geforderte ziemlich scharf ausgeprägte Gegensatz.

Die Mastzellen sind überhaupt ein Objekt, das zu mannigfachen Kontroversen vom rein histologisch-morphologischen Standpunkt aus viel Anlaß gegeben hat. Die Bezeichnung ist noch nicht so genau umrissen wie bei den schon länger genau untersuchten Zellen. Von Zeit zu Zeit begegnet man in der histologischen Literatur polemischen Darlegungen, in denen auf Verwechslungen ganz differenter Zellen hingewiesen wird, die nach oberflächlicher Betrachtung zu den Mastzellen in enger Beziehung stehen. Die Vitalfärbungen der letzten Jahre haben in der unmittelbaren Nachbarschaft der Blutkapillaren Wanderzellen mit einer starken Affinität zu sauren Farbstoffen und elektronegativen Emulsionen entdeckt, die von Ranvier Klasmatozyten genannt werden, von Renaut cellules rhagiocrines, von Marchand Adventitiazellen, von Goldmann Pyrrholzellen. Vom elektrischen Standpunkt wäre es das einfachste, wenn die elektronegativ reagierenden Mastzellen keine richtigen Mastzellen wären, sondern eine morphologisch ähnliche Zelle mit ganz anderer Funktion und entgegengesetzter Elektrizitätsladung vom Typus der Pyrrholzelle oder der elektronegativ sich färbenden Histozyten.

Goldmann*) gibt an, daß seine vitale Methode die Pyrrholzelle von der Mastzelle genau unterscheidet. Die Mastzellenkörnung ist zumeist eine gröbere. Besonders wenn er mit Neutralrot doppelt färbte, waren die Pyrrholzellen blau, die Mastzellen rot. Auch mit anderen Doppelfärbungen hat er sie von einander differenziert. Nach diesen und anderen Beschreibungen sieht es so aus, als ob diese sehr ähnlichen Zellgattungen mit einander verwechselt werden, aber in ihrer Elektropolarität verschieden sind. Auch Goldmann scheint diesen so lange unbeachtet gebliebenen Zellen eine große Bedeutung im Stoffwechsel beizulegen. Wie Unna schildert er, daß das mikroskopische Bild gewisser Vitalfärbungen von dieser Zellart beherrscht wird. Er zitiert Renaut, Krehl und Abderhalden, die dem Bindegewebe übereinstimmend eine große Rolle (vielleicht als größtes Organ der inneren Sekretion) zuschreiben und bedauert, diesem Gedanken nicht experimentell nachgehen zu können.

*) Die äußere und innere Sekretion, p. 29.

Als einer der stärksten Anodenorte fällt sowohl in Unnas Bildern, als in den teilweise älteren von Goldmann, Schulemann, Kiyono u. a. das Retikulum-Gewebe der Blut-Lymphdrüsen auf. Schon mit freiem Auge heben sich bei sauren Vitalfärbungen die Blutlymphdrüsen und Milz auffällig von allen anderen Organen ab, in Uebereinstimmung damit bildet auch Unna die Lymphfollikel der Lunge tiefblau bei seiner Oxydationsfärbung ab. Das stimmt nicht nur untereinander sehr gut überein, es stimmt auch zu der Idee, daß in den Lymphdrüsen das Blut von jenen Blutzellen befreit wird, die nicht mehr ihre arteigene normale positive Ladung haben und infolgedessen von den Phagozyten der Drüsen übernommen werden. Goldmann*) spricht ausdrücklich vom „wandungslosen Reticulum" dieser Drüsen. In diesem wandungslosen Netzgewebe kann nur ein starkes System elektrostatischer Ladungen die Strömung aufrechterhalten und nach bestimmten Richtungen lenken!

DIE ARGUMENTE DER CHEMISCHEN TINKTIONSLEHRE.

Die Bemerkungen Schulemanns, der in der Phagozytose (Aufnahme mikroskopischer Korpuskeln und Bakterien durch Zellen, insbesondere durch gewisse weiße Blutkörperchen) und in den mikroskopischen Färbungen elektrische Kräfte zu erkennen glaubte, sind nicht unbeantwortet geblieben. In einem Buche des Japaners K. Kiyono**) gibt dieser unter der Leitung von Aschoff arbeitende Forscher bei diesem Anlasse die landläufigen Meinungen der gegenwärtig herrschenden Theorie wieder. Er sagt über die Mitteilungen von Evans, Schulemann und Wilborn etwa Folgendes:

„Es scheint mir nicht richtig, diese Anschauung (der elektrischen Wirkung), auf alle vitalen Farbstoffe auszudehnen und den Vorgang ohne weiters als Phagozytose zu bezeichnen. Die drei Autoren scheinen hauptsächlich zur Begründung ihrer Theorie diejenigen phagozytierenden Zellen (Histiozyten) und deren Mutterzellen, nämlich die Kupffer'schen Sternzellen und Retikuloendothelien der blutbildenden Organe u. a. zu berücksichtigen, welche im Leben den granulären Farbstoff aufweisen

*) P. 68.
**) Die vitale Karminspeicherung. Jena Fischer, 1914.

und gleichzeitig Phagozyten sind. Es ist jedoch höchst fraglich, ob die Epithelzellen des Plexus chorioideus, die Nierenepithelien, die Parenchymzellen der Nebennierenrinde etc. Phagozyten sind. Auf der anderen Seite wissen wir jedoch, daß die vital ungekörnten polynukleären Leukozyten auch Phagozyten sind. Bei Färbungen mit anderen Farbstoffen stoßen wir noch auf viele unerklärbare Tatsachen, so z. B. daß der Kern der Nierenepithelien durch Indigkarmin blau wird etc. Ich glaube, wie schon Anitschkow mit Recht betonte, daß es sich um eine granuläre Einlagerung von Cholesterin in die Histiozyten und deren mütterliche Zellen handelt. Wahrscheinlich ist das Cholesterin in dem Gewebssaft als kolloidale Lösung vorhanden. Die kolloidale Lösung und die hochmolekularen Farbstofflösungen müssen jedenfalls von den bestimmten Zellarten in ähnlicher Weise aufgenommen werden. Das wird man aber schwerlich als „Phagozytose" bezeichnen können. Dagegen kann man sehr wohl an Adsorptionsprozesse denken, die, von der physikalischen Struktur der Granula abhängig, die verschiedenartigsten Stoffe, soweit sie entsprechend gelöst bis zu den Granula vordringen können, aufspeichern. In diesem Sinne haben wir auch stets von einer Karminspeicherungs- nicht von einer Karminbindungsmethode gesprochen. Da aber beide Vorgänge, der physikalische wie auch der chemische, schließlich zum gleichen Resultat, nämlich zu einer Färbung bestimmter Strukturelemente führen, habe ich im allgemeinen den Ausdruck „vitale Färbung" beibehalten, verstehe darunter aber für das Karmin die vitale Speicherung.

Die Frage, ob die Färbungen chemische oder elektrische oder „Adsorptions"-Erscheinungen sind, eine Grundfrage der lebenden Materie überhaupt, kann natürlich nicht so nebenbei damit abgetan werden, daß einige Zellen keine Phagozyten sein dürften, die sauere Farbstoffe speichern. Abgesehen davon, daß Kiyono sich keineswegs die Mühe genommen hat, die Frage experimentell oder durch Deduktionen eingehend zu prüfen, kam es doch Schulemann keineswegs darauf an, daß gerade nur Phagozyten eine Anodenladung zeigen. Seine Beobachtung bezog sich doch nur darauf, das Verwandte beider Erscheinungen festzustellen.

Die elektrische Natur der Färbungen läßt ja die mannigfachsten Abstufungen und Nebenerscheinungen zu. Es kann bei

einer bestimmten hohen Spannung zu einer Anziehung sichtbarer fester Partikelchen kommen, bei einer anderen Spannung und größeren Stromdichte zu einer Elektrolyse gewisser Farblösungen, während andere Farblösungen von derselben Spannung nicht zersetzt werden. Die Elektrolyse der Tinktionsflüssigkeit läßt also die mannigfachsten Variationen zu und es ist kein Einwand, daß bestimmte Zellen phagozytieren und bestimmte nicht. Ueberhaupt ist nichts leichter, als daß man bei einer neuen Annahme einige wirkliche Tatsachen findet, die nicht zu ihr passen, denn es ist eine der allgemeinsten Eigenschaften der Hypothesen, der alten sowohl wie der neuen, daß sie nicht alle Vorgänge erklären können. Die hier zitierte Annahme von Anitschkow, daß es sich um eine granuläre Einlagerung von Cholesterin in die Histiozyten handelt, ist demgegenüber so haltlos, so gar nicht auf feststehenden Tatsachen begründet, so vollkommen versagend gegenüber der Regelmäßigkeit der anodischen und kathodischen Bilder, daß nur die allgemeine Vorliebe für rein chemische Phantasien erklären kann, daß derartige Annahmen aufgestellt werden und auch noch Beifall finden.

In dieselbe Kategorie gehört die Vorliebe für Adsorptionserscheinungen, die auch gern gegen eine breitere physikalische Auffassung ins Feld geführt werden, ähnlich wie die in diesem Zusammenhang gewöhnlich mißverständliche Zitierung der Oberflächenspannung. Alle diese physikalischen Spezialenergien sind schließlich genau so wie die chemische Energie in einem unmittelbaren Zusammenhang mit den elektrostatischen Ladungen der Ionen und Elektronen, insoweit sie nicht direkt ihr Ausfluß sind. Die Zusammenhänge sind allerdings bisher nur zum geringsten Teile aufgedeckt und erforscht, aber es geht auf keinen Fall an, bei einem Experiment, bei dem elektropositive Punkte negative Kolloide an sich ziehen, zu behaupten, dies ist keine elektrische Anziehungskraft, sondern eine Adsorptionserscheinung.

Kiyono wendet gegen die elektrochemische Auffassung ein, daß die polynukleären Leukozyten sich vital nicht färben und doch Phagozyten sind und daß der Kern der Nierenepithelien sich mit Indigkarmin blau färbt. Wenn irgend etwas diese Sonderfälle wird erklären können, so wird es sicher die elektrochemische Annahme sein, denn nur diese kann es verständlich machen, daß

nicht nur ähnliche Zellen, sondern sogar dieselbe Zelle in verschiedenen Zuständen dieselben chemischen Stoffe während der Assimilationsrichtung der Elektrizitätsbewegung gegenteilig ausfärbt wie während der Dissimilationsrichtung der Elektrizitätsbewegung.

Die Polemik gegen die elektrische Auffassung der Zelltinktionen darf niemals von dem Standpunkte ausgehen, als ob die Elektrizität in der Zelle überhaupt erst entdeckt oder nachgewiesen werden müsse. Diese ist bestimmt da, bestätigt durch Tausende von Experimenten nicht nur an Muskeln, Nerven und elektrischen Organen, sondern auch an Drüsen, Häuten, Pflanzenzellen, Sinnesorganen wie überhaupt ausnahmslos an allen Zellen, die man bisher untersucht hat. Da man nun in allen Zellen immer wieder regelmäßige elektrische Potentialdifferenzen bestimmter Art und Richtung gegen die Zelloberflächen auffand, so kann der Streit niemals darum gehen, ob Zellelektrizität vorhanden ist, sondern nur darum, ob diese elektrischen Zellpotentiale stark genug sind, um die an die Zelle im normalen Leben oder durch künstliche Färbungen herangebrachten chemischen Stoffe elektrolytisch zu zerlegen. Gegenüber der so gestellten Frage nun sind die Argumente Kiyonos, die sich mit jenen der einseitig chemisch Befangenen decken, wirklich unerheblich und weit davon entfernt, den Kern des Problems zu berühren.

DIE ARGUMENTE GEGEN DIE ELEKTROCHEMIE DES STOFFWECHSELS.

Meine älteren Arbeiten aus den Jahren 1897 bis 1902 über die Elektrochemie der Zelle und die elektrochemische Natur der histologischen Färbungen sind nahezu gänzlich unbeachtet geblieben. Ich wäre auch ganz von diesem Gegenstand abgekommen, wenn nicht der verstorbene Georg Hirth, der sich für elektrochemische Physiologie ungeheuer interessierte und verschiedene interessante Arbeiten verfaßt*) hat, meine alten Schriften ausgegraben und mich energisch dazu ermutigt hätte, meine Versuche neuerlich aufzunehmen, zu deren Gunsten inzwischen

*) Der elektrochemische Betrieb der Organismen. München 1911.



Andere ein sehr großes experimentelles Material zusammengetragen hatten. Ich kannte den ungewöhnlich weitblickenden und kenntnisreichen Mann früher nicht, sondern habe ihn erst kennen gelernt, als er sich nach meiner Adresse erkundigte, um mir seine rückhaltslose, geradezu begeisterte Zustimmung zu meinen Gedanken auszudrücken.

Zu jener Zeit besaß ich auch schon zustimmende Zuschriften einiger Biologen vom Fach, die sich vereinzelt, zumeist aus dem Auslande, für meine Hypothesen interessierten. Alle stimmten darin überein, daß ich mich der experimentellen Durcharbeitung dieser Idee widmen sollte, ein Gedanke, dessen Realisierung aus verschiedenen Ursachen sich bei mir lange nicht durchführen ließ.

Lange habe ich mich mit der Hoffnung getragen, daß es mir gelingen werde, eine mikroelektrische Sonde zu konstruieren, mit der ich meine Annahmen mit einem Schlage durch zwingende Beweise verifizieren wollte. Man sollte glauben, daß das eine sehr einfache Sache ist, ich bin auch dessen ganz sicher, daß ein geschickter Mechaniker das Mikro-Elektroskop zustande bringt, bin aber durch Zufälligkeiten bisher nicht dazu gekommen.

Hirth, der kürzlich gestorben ist, hat ebensowenig wie ich das Glück gehabt, die konservative Wissenschaft für die elektrochemische Stoffwechsellehre zu interessieren. Man genierte sich wahrscheinlich, dem physiologischen Wunderkind von 70 Jahren, das auf so vielen anderen Gebieten eine geniale Intuitionsgabe und eine unerschöpfliche geistige Schaffenskraft bewiesen hatte, voll auszusprechen, was den Berufsphysiologen beim Lesen einer solchen Schrift auf der Zunge liegt. Für Dilettanten, die auf 100 Druckseiten die vorhandenen physiologischen Probleme endgültig lösen wollen, dazu im Vorbeigehen noch die halbe Psychologie mitnehmen und es nicht unterlassen, auch das Vererbungs- und das Alkoholproblem vom Standpunkt ihrer alleinseligmachenden Idee zu betrachten für solche Autoren hat der Fachphysiologe nur ein mitleidiges Lächeln.

Man muß sich damit bescheiden, daß die Berufsphysiologen sich nur durch die Vorführung der blendendsten experimentellen Tatsachen von ihren im ganzen bewährten und erfolgreichen Methoden abbringen lassen werden, aber ich kann nicht die

Gegenbemerkung unterdrücken, daß viele Arbeiten physiologischer Fachmänner bei jenen, die sich intensiver dem Studium der reinen Physik ergeben haben, ähnliche Gefühle hervorbringen. Bisweilen stolpert man geradezu über offensichtliche Fehler, die man als physikalische Orthographiefehler bezeichnen könnte, und zwar nicht etwa nur bei der Bearbeitung der physikalisch-chemischen Untersuchungsgebiete, sondern auch bei der Bearbeitung von Licht-, Wärme oder Gravitationstatsachen. Wenn man bei der Behandlung der Grenzgebiete der Wissenschaften rascher sich verständigen will, so ist eine große Portion gegenseitiger liebevoller Nachsicht sehr am Platze und man vergibt sich nichts, wenn man Erörterungen folgt, welche wie die Hirths eine gewisse Unkenntnis der histologischen und anatomisch-morphologischen Literatur in jeder Zeile verraten. In keiner Wissenschaft, auch nicht in der Physiologie, findet sich eine solche Ueberfülle an selbständigen Köpfen mit weitblickender Assoziations- und Unterscheidungskraft, daß man einen so seltenen Schatz wie die geistige Mitarbeit Georg Hirths mit Geringschätzung oder Ignorierung übergehen könnte. In unserer Zeit der literarischen und wissenschaftlichen Massenproduktion hat nur Eines, ein wahrhaft starkes Gehirn, noch seinen Seltenheitswert behalten und es wird sich für alle jüngeren Forscher empfehlen, sich in die Gedankengänge Hirths einzuarbeiten und seine großen Ideen durch experimentelle Arbeit fortzuführen. Ich sage das in vollem Bewußtsein dessen, daß Hirth gelegentlich in Irrtümer verfällt. In seiner Grundanschauung hat er unzweifelhaft mit genialem Zugriff das Richtige erfaßt und es mit überzeugender Beredtsamkeit zur anschaulichen Wirkung gebracht.

Besonders überzeugend ist das, was er gegen die Einwände der Fachphysiologen gegen die Idee des elektrochemischen Stoffwechsels sagt. Hermann, einer der erfolgreichsten und gründlichsten Bearbeiter der elektrophysiologischen Probleme, hatte gegen die elektrische Natur des physiologischen Problems folgendes hervorgehoben: Abwesenheit geschlossener Stromkreise und stromgebender batterieartiger Apparate, das Fehlen jeder galvanischen Isolation der Nervenfasern, die Langsamkeit der nervösen Leitung, ferner die relative Unerregbarkeit unserer Sinnesapparate gegen von außen eintretende Elektrizität. Er sagt: „Unsere Empfindungen ebenso wie unsere motorischen

Impulse erleiden keine wesentliche Ablenkung oder gar Aufhebung durch fremde Ströme, vorausgesetzt, daß die letzteren nicht durch ihre Stärke geradezu lähmend wirken. Unter den verschiedensten Stromdurchflutungen der Elektrisiermaschine fühlen und denken wir „normal", die maschinellen Zuckungen sind nur lästig, stören aber den Ablauf der biologischen Funktion kaum".

Darauf erwidert Hirth: „Aber, so frage ich, warum sollen wir aus diesen und ähnlichen Gründen der Mutter Elektra eine Grube graben? In ihren organischen Kindern haben wir die denkbar feinsten und überdies durch millionenfache Um- und Neuzeugung in kolloidalen Hüllen seßhaft gewordenen Formen. Wo bleiben aber bei den elementargewaltigen Urformen der Elektrizität im Weltäther (Licht) und in der Lufthülle unseres Planeten die so beliebten Analogien mit der Elektrisiermaschine? Ist etwa der nahe Blitz, ist das ferne Wetterleuchten nicht Elektrizität? Keinem Menschen fällt es ein, hier aus der Abwesenheit geschlossener Stromkreise, galvanischer Isolationen, aus unverständlichen Einwirkungen usw. der Elektra den Strick des non licet zu drehen. Sind wir hier, wo die Naturkraft in breiten Fluten scheinbar ungezügelt alles Lebendige und Tote durchbebt, sind wir hier nicht skrupulös mit der Anerkennung der Elektrizität, dann brauchen wir es auch nicht bei ihren organischen Formen und Gebilden zu sein . . . Eine Elektrizitätsform schließt die andere, ein Strom den anderen nicht aus. Daß sie sich vertragen und unabhängig von einander funktionieren, hängt vielmehr von ihrem Stärkeverhältnis und von chemischen und mechanischen Nebenumständen als von der angeblichen Ungleichartigkeit ihres Wesens ab. Es wäre sehr schlimm um uns bestellt, wenn während eines Nahgewitters alle zart konstruierten elektrischen Apparate zu funktionieren aufhörten. Überhaupt, warum wurden die von Menschen (vor wenigen Menschenaltern!) konstruierten Apparate als ideale Standardmuster zum Vergleich herangezogen, und nicht die von der Natur nach millionenjährigem Ringen bereitgestellten?

Stromgebende Batterien hat das Nervensystem freilich nicht genau in dem Sinne der Elektrisiermaschine und des elektrischen Motors, aber auf die leisesten Reize aus den Zen-

tralorganen antwortet der vom Muskelapparat gebildete Akkumulator mit der Entfesselung von Kräften, welche Zentnerlasten in Bewegung setzen. Die Elemente des sensiblen und Meldeapparates bedürfen wegen der sicheren und subtilen Reaktion auch auf die allerleisesten Reize nur minimaler Potentiale; sie sind gewiß ebenso oder fast ebenso unermüdlich wie die Nervenfasern selbst.

Alles in allem geht mein ceterum censeo dahin, daß wir die Elektrizität überall da als immanent und aktiv anerkennen sollten, wo Elektronen im Spiele und unerläßlich sind. Ich meine, diese Forderung sei einleuchtend und nicht unbillig, wohl auch geeignet, jedem Okkultismus auf diesem Gebiete mit Erfolg zu begegnen".

DIE MÖGLICHKEIT EINER UNIPOLAREN ELEKTROLYSE.

Was Hirth darüber sagt, daß man rohe Analogien unserer jungen elektrotechnischen Praxis nicht einfach auf physiologische Ueberlegungen anwenden soll und das Fehlen unserer gewohnten Stromquellen nicht als einen Fehler des organischen Betriebes betrachten soll, der möglicherweise über viel ökonomischere Stromquellen verfügt, das gilt vor allem über die Rolle des Blutes und der anderen Organsäfte als Elektrolyten. Für jemand, der den Stoffwechsel als eine unter anderem auch elektrochemisch dirigierte Energieumwandlung betrachtet, ist es unerläßlich, daß er alle wässerigen Organsäfte, aber auch die Lösungen der Salze und Salzlösungen in Fetten und in Lipoiden als Elektrolyte betrachtet. Der große Gedanke Hirths liegt nun darin, erkannt zu haben, daß die höheren Tiere ein eigenes „Organ" entwickelt haben, dem die elektrolytische Tätigkeit als Hauptaufgabe zufällt und dieses Organ ist das Blut. Die Begründung dieser Hypothese mag man bei Hirth nachlesen, ich möchte hier zu den Hirthschen Argumenten Einiges hinzufügen, und zwar auf Grund der Analogien mit den Methoden der elektrochemischen Technik, die in diesem Falle doch einiges Licht über die Rolle eines organischen Elektrolyten verbreiten können.

Ich möchte hier in Grundzügen die Geschichte eines Hauptproblems der elektrochemischen Technik erzählen, um zu zeigen,

daß die technische Praxis elektrochemisch noch weit hinter der biologischen Organisation zurück ist. Die technische Elektrochemie bearbeitet nämlich seit Jahrzehnten die Aufgabe, aus Kohle und aus organischen Verbindungen auf kaltem Wege die potentielle chemische Energie der Verbrennung in Luftsauerstoff zu gewinnen. Es hat sich dabei gezeigt, daß es vorläufig unökonomisch ist, Kohle selbst in den Elementen zu verwenden, weil die Aschenbestandteile der natürlichen Kohle diese zur galvanischen Erzeugung elektrischer Energie unbrauchbar machen, abgesehen von anderen Nachteilen technischer Natur. Nach den ersten Versuchen von Jablokoff ging später Borchers dazu über, die Kohle erst zu vergasen und die Kohlenwasserstoffe, den Wasserstoff und das Kohlenoxyd als Materialien einer Gaskette zu benützen.

Nun ergaben sich folgende Hauptschwierigkeiten: Bekanntlich benötigen konstante galvanische Elemente an der Kathode einen sogenannten Depolarisator, ein Oxydationsmittel, das den naszierenden Wasserstoff beseitigt und ihn verhindert, durch Bläschenbildung den Stromwiderstand zu vergrößern und durch seine eigene positive Kraft eine gegenelektromotorische Kraft (Polarisation) auszuüben. Solche Depolarisatoren gibtes in Menge, aber sie sollten zugleich billig sein, d. h. sich leicht und ohne großen Energieaufwand regenerieren lassen. Denn die ganze Betriebsökonomie des Kohlenelements, des theoretisch billigsten Stromerzeugers, mußte verloren gehen, wenn sich dabei ein teuerer Depolarisator, z. B. Bleisuperoxyd verbraucht hätte. Man suchte also einen Depolarisator, der sich mit Luftsauerstoff leicht wieder regenerieren läßt und Borchers schlug dafür Kupferchlorid in Salzsäure vor, das sich als Depolarisator in Kupferchlorür verwandelt und vom Luftsauerstoff in Kupferchlorid zurückverwandelt wird.

Aber Borchers erkannte bald, daß diese Gaskette praktisch schwere Nachteile an sich hatte. Man hätte das ganze System fortwährend mit großem Energieaufwand durchlüften müssen, wenn man von der Laboratoriumseigenschaft des Kupferchlorids einen genügend intensiven Gewinn für die Depolarisierung hätte ziehen wollen. Borchers selbst verfiel auf eine Modifikation seines Elements, indem er feinverteiltes Kupfer, das sich an der Luft leicht zu Kupferoxyd oxydiert, als Sauer-

stoffüberträger vorschlug. Aber auch diese Kombination befriedigte nicht.

Das läßt sich leicht begreifen. Ein fester oder kolloidaler Depolarisator kann nur dann eine praktisch erhebliche Wirksamkeit entfalten, wenn er eine sehr große Oberfläche aktiv zur Geltung bringen kann und wenn er nach seinem Verbrauch an der Kathode so stetig zur Luft zurückzirkuliert, daß er eine konstante Potentialdifferenz herbeiführen kann. Man hat später diesen Gedanken durchführen wollen, und hat zirkulierende Elektrolyte konstruiert, ferner wenigstens die Anodenfläche durch Koksstücke so groß als möglich gemacht, da man einen Depolarisator, der dem Strom stetig eine maximale Oberfläche zukehrt, nicht finden konnte. Eine so oder ähnlich konstruierte Kohlengas-Batterie haben Mond und Langer vor fünfzehn oder zwanzig Jahren konstruiert. Man hat später nichts mehr von diesem theoretisch sehr interessanten Apparat gehört. Sicher ist, daß der Nutzeffekt aller dieser und zahlreicher anderer Konstruktionen schwer enttäuschte.

Wer diese Entwicklung verfolgt hat, dem drängt sich die Analogie mit dem Blut als Elektrolyten an mehreren Stellen auf. Das Blut hat als Elektrolyt dieselbe Hauptaufgabe wie der Elektrolyt der Kohlengaselemente, es soll die organischen Kohlenstoffverbindungen mit dem Luftsauerstoff bei mittleren Temperaturen fest oder lose verbinden. Es soll einen Depolarisator enthalten, der beim geringsten Sauerstoffüberdruck sich regeneriert, der eine maximale Oberflächenentwicklung aufweist (um bei der minimalen Stromstärke einen erheblichen Stoffumsatz zu erzeugen), er soll ferner stetig zur Luft zurückzirkulieren, um konstante Potentialgefälle zu erzeugen, lauter Erfordernisse, die das Blut mit seinem Oxyhämoglobin in den roten Blutkörperchen in einer idealen Weise erfüllt, die in der technischen Elektrochemie nicht ihresgleichen hat. Weder besitzt die technische Praxis einen Depolarisator von der leichten Regenerierbarkeit des Oxyhämoglobins, noch einen mit einer annähernder Oberflächenentwicklung von 1400 m^2 (Blutkörperchen-Querschnitt des Menschen), noch eine so regelmäßige und regulierbare Zirkulation und schließlich ist es nicht unmöglich, daß die biologische Stoffsynthese und -elektrolyse auch dadurch ein Höchstmaß von Ökonomie ergibt, daß sie im „offenen" Strom

arbeitet, daß die Potentialdifferenz nicht abgeleitet werden muß, sondern daß die Blutkörperchen an manchen Stellen unipolar sich entladen, daß sie vielleicht zugleich Depolarisatoren und Elektroden darstellen, daß somit die ganze freiwerdende Energie im inneren System gleich alle gewünschten Energieleistungen: Wärme, Konzentrationsgefälle, antiosmotische Steigungs-Ueberwindungen, Membrangefälle leistet, je nach der Anlage und Anordnung der Zellelemente in den einzelnen von Blut durchflossenen Kapillaren auf der einen Seite und den Nahrungsstoff-Polen auf der Gegenseite. (Ganz roh ausgedrückt.)

Auf den ersten Blick muß es einleuchten, daß die technischen Elektrochemiker, wenn es ihnen möglich wäre, es ebenfalls vorziehen würden, die von den Batterien erzeugten Potentialdifferenzen nicht durch Metalle in einen äußeren Stromkreis abzulenken, sondern, wenn der Strom für chemische Abbauleistungen oder Synthesen gebraucht wird, dem Elektrolyten eine solche Zusammensetzung zu geben, daß sich alle Umsetzungen gleichsam auf der inneren Linie in der Batterie selbst abwickeln und ein feines und regelmäßiges Zirkulationssystem stets für ein Fortdauern der Gleichgewichtsbedingungen sorgen könnte.

In einem weiteren Sinne kann man alle chemischen Reaktionen, die der Organismus ohne Strom und ohne Elektroden mit einer endlichen Geschwindigkeit durchführt, als Vielheit solcher „offener“ Ströme bezeichnen als unipolare Elektrolysen, wobei vielleicht kontinuierlich geladene Zellteile zu einander geführt werden und ihre statischen Aufladungen so kontinuierlich gegen einander entladen, daß eine unipolare Elektrolyse entstehen könnte, die aus statischen und galvanischen Erscheinungen zusammengesetzt ist. Nur gelangt man dadurch zu der Methode jener, welche den Gedankeninhalt der neueren physikalisch-chemischen Methode dadurch für die Physiologie dienstbar machen wollen, daß sie die neuen Bezeichnungen auf die Physiologie übertragen; wir wissen ja längst, daß alle chemischen Reaktionen elektrochemische Gleichgewichts-Änderungen bedeuten, Ionen-Reaktionen sind, womit aber nicht viel für das physiologische Verständnis gewonnen ist. Die Physiologie wird die physikalisch-chemischen Methoden erst wirklich in Besitz nehmen, bis sie sich über die Grundlinien der elektrischen Polarität der Zellen und Zellkomplexe ein klares Bild machen kann.

Mathematisch gesprochen sind die Ionenwirkungen in lebenden Zellen, ebenso wie die Enzymwirkungen nicht skalare, sondern vektorielle Größen und ihre Gesetze lassen sich nur erforschen, wenn nicht nur die Zahlengrößen, sondern auch die Richtungen bekannt sind.

VERSUCHSPLAN FÜR MIKROSKOPISCHE GEFRIERPUNKT-BESTIMMUNGEN.

Zur Entscheidung der Frage, wie sich die Salze und Ionen im Zellgewebe verteilen, habe ich mir eine neue Versuchs-Methode zurecht gelegt, von der ich die Beantwortung einiger wichtiger Fragen erwarte, von der ich aber nicht weiß, ob ich jemals dazu gelangen werde, sie praktisch auszuarbeiten. Ich habe mir nämlich gedacht, daß es auf irgend eine Weise gelingen müßte, die verschiedenen Gefrierpunkte verschiedener Stoffe und verschiedener Lösungen dazu auszunützen, die mikrochemischen Analysen zu berichtigen und zu verfeinern. Wie bekannt, haben Lösungen mit einer erheblichen Molekülanzahl, vor allem dissoziierte Salzlösungen wie alle Körpersäfte einen niedrigeren Gefrierpunkt als reines Wasser. Die Molekülanzahl läßt sich genau berechnen.

Mit dem Beckmannschen Apparat läßt sich makroskopisch bestimmen, in welchen Konzentrationen einfache Salze vorhanden sind und in allen Fällen, wie viel Moleküle und Ionen sich in der Lösung befinden. Dieses Verfahren müßte nun sinngemäß für die mikroskopische Analyse verwendbar gemacht werden, indem man etwa Mikroskop und Objekt in einen Eiskasten einbaut, dessen Temperatur sich auf Zehntel-Grade um den Nullpunkt regulieren ließe. Bei den ersten rohen Versuchen würde man beispielsweise Gefrierschnitte durch Harnkanälchen bei ihrem Auftauen in gewissen Perioden beobachten, wobei die dunklen Wärmestrahlen von dem Objekt abgeblendet werden müßten. Man würde dabei, sofern das Gefrieren sehr rasch vor sich gegangen wäre und nicht zu viel reines Wasser beim langsamen Gefrieren auskristallisiert und die Konzentrationen verändert hätte, vielleicht schon bei den Vorversuchen erkennen, in welcher Weise das natürliche Konzentrationsgefälle sich in normalen Harnkanälchen verteilt, ob die wandständigen

Partien konzentrierter sind (also das Kanälchenepithel an der Konzentrationsarbeit der Niere mitwirkt), oder weniger konzentriert sind (also das Epithel Salze absaugt) oder indifferent, ob das Glomerulusfiltrat reines Wasser ist vom Schmelzpunkt 0°, oder Blutkonzentration vom Schmelzpunkt —0,58° oder schon Harnkonzentration vom Schmelzpunkt —1 bis —2,5° besitzt. Hat man einmal erst die ungefähren Schmelzpunkte der einzelnen Flüssigkeitsfäden, so scheint es mir bei genauerer Beobachtung nicht ausgeschlossen, daß man bei vorbereiteter langsamer Abstufung der kritischen Temperatur dann die genauen Schmelzpunkte der einzelnen Flüssigkeitsfäden, Vakuoleninhalte, Sekrete und Exkrete bestimmen kann.

Die Kenntnis der genauen Schmelzpunkte der einzelnen flüssigen oder wässerigen Teile der Zelle möchte ich für eine der dringendsten Aufgaben der praktischen Bio-Mikrochemie ansehen, nicht nur aus den hier angedeuteten Gründen der Entscheidung von Spezialfragen, ob die Filtrations- oder die Sekretionstheorie der Niere recht behält, ob die Filtrations- oder die Sekretionstheorie der Lymphbildung die richtige ist, ob in den Muskelscheibchen selbst oder an welcher Stelle des Sarkoplasmas die Stoffwechselprodukte der Kontraktion zuerst sichtbar werden. Diese Kenntnis wäre überhaupt der Anfang der ersten wirklichen Mikroanalyse.

Wie schon so oft hervorgehoben, gelten die einfachen Laboratoriums-Analysen nicht für die Zelle und ergeben in sehr vielen Fällen das Gegenteil des wirklichen Sachverhalts. Wenn man die um einige Zehntel Grade auseinanderliegenden Schmelzpunkte (oder Gefrierpunkte) der Zellteile genau kennen wird, so besteht die Hoffnung, daß es einem geschickten, subtilen Analytiker gelingen wird, aus Gefrierschnitten mit auf Zehntel-Grade abgestuften wässerigen Lösungen die einzelnen Zellelemente gesondert herauszulösen, soweit sie im normalen Leben flüssig sind und dann mit den zuverlässigen makroskopischen Methoden bequem zu analysieren.

Natürlich wird es keine leichte Aufgabe sein, einen so schwierigen Versuchsplan praktisch durchzuführen, aber sie ist sicher nicht unlösbar, und wenn nur ein paar Versuche dieser Art gelingen würden, so würde das sicher genügen, um einige der schädlichsten Vorurteile der Histochemiker zu beseitigen, zum Bei-

spiel das oft erwähnte, daß die basenanziehenden Punkte Säuren sind und die säureanziehenden Basen. Es wird sich mit voller Bestimmtheit ergeben, daß Vakuolen, die basophil sind, beim separaten Herauslösen basisch reagieren werden und ich wage zu prophezeien, daß die Azidität oder Basizität der einzelnen Zellteile, die im Gesamtgewebe sich annähernd neutralisiert, innerhalb der durchschnittenen Zellen sich als überraschend stark erweisen wird.

DIE ROTEN BLUTKÖRPERCHEN IN DER ZIRKULATION.

Der Gedanke, die elektropolare Rolle des roten Blutkörperchens zu einer speziellen Annahme auszugestalten, lag eigentlich nicht in meinem Programm. Es liegt so wenig experimentelles Material vor, das sich für den elektrochemischen Sauerstofftransport deuten läßt, daß die ziemlich naheliegende Idee, die Lunge als elektrolytisches Gaselement zu erklären, wenig konkrete experimentelle Tatsachen zu ihren Gunsten vorfindet. Daß die Lunge kein einfaches Kohlenstoffverbindungs-Gaselement ist, zum Zwecke der technisch so lange gesuchten direkten Umwandlung von Kohlenenergie in elektrische Energie, geht schon aus dem chemischen Stoffverbrauch hervor, da die Lunge doch nur einen kleinen Teil des aufgenommenen Sauerstoffes selber verbraucht und ausnützt und den größten Teil in die Gewebe entläßt, wo der Hauptverbrauch stattfindet. Wenn also die Lunge mit einem Gaselement zu vergleichen wäre, so ist der Hauptsitz der Oxydation und der Energieumwandlung in den Geweben zu denken, und auch nur dort das Blutkörperchen als Depolarisator. In der Lunge, wo das Hämoglobin den Sauerstoff aufnimmt (nicht abgibt), ist das Oxyhämoglobin noch kein Depolarisator, sondern bereitet sich durch eine Reaktion konträrer Art auf seine depolarisierende Aufgabe in den Geweben vor (wenn man vom eigenen Stoffwechsel der Lunge absieht). Auch der Ausdruck Depolarisator, der der technischen Elektrochemie entstammt, ist, wie alle Analogien, nicht korrekt. Bei einer unipolaren Entladung, wie sie möglicherweise im Zellstoffwechsel vor sich geht, braucht man unter Umständen keinen Depolarisator, der ja nur zur Aufrechterhaltung der Konstanz eines bipo-

laren Stromes zu dienen hat. Ob in den Geweben bipolare Elektrodenflächen existieren und das Oxyhämoglobin-beladene Blutkörperchen an ihnen nur vorübergeführt wird, als ein wirklicher Depolarisator, oder ob das Blutkörperchen in den Kapillaren selber zur Elektrode wird und seinen Sauerstoffvorrat in die Reduktionsorte der Zellen entlädt, darüber wage ich nicht einmal Vermutungen vorzubringen, solange nicht eine allererste primitive Elektro-Histologie der Gewebe ausgearbeitet ist.

Unter den Physiologen sind die Meinungen darüber geteilt, ob die Schule von Pfüger recht hat, welche den Sauerstoffstrom in der Lunge auf Diffusion zurückführt, oder die Partei von Bohr, welche die Ausstoßung der Kohlensäure für eine Sekretion erklärt und ebenso die Aufnahme des Sauerstoffs durch das Hämoglobin auf eine aktive Zelltätigkeit zurückführt. Ich habe niemals verstehen können, wie man bei der Sauerstoffaufnahme der Lunge daran denken konnte, daß der um wenige Hundertteile höhere Sauerstoffgehalt oder niedrigere Kohlensäuregehalt der Alveolarluft der Lunge die Diffusion mit den Blutkörperchen herbeiführen soll, nicht bloß deshalb, weil die verschiedenen Partiärdrucke der Kohlensäure und des Sauerstoffs von ernsten Forschern bestritten werden, sondern weil ich selbst bei zehn Prozent mehr Kohlensäure auf den Erythrozyten nicht glauben kann, daß der Aufenthalt des Blutkörperchens in den Lungenalveolen im Bruchteil einer Minute einen Diffusionsausgleich hin und zurück zuwege bringt. Abgesehen von den großen experimentellen Schwierigkeiten, die eine auf jede Atmungsphase genaue Gasanalyse der Lungenalveolen wohl niemals erlauben werden, besteht doch gar keine erkennbare Notwendigkeit, diese für hundert andere Zellteile gelöste Frage gerade in der Lunge endgültig entscheiden zu wollen, da alle anderen Organe und Zellen, bei denen man das aktive Auswählvermögen der Zelle sicher experimentell erfassen konnte, eine aktive Tätigkeit der Zelle ergeben haben. Leistet nicht jede Zelle der Pflanzenwurzel Wunderbares an antiosmotischer Kraft, indem sie Zehntausendstel von gelösten Salzen auf sich konzentriert, leistet nicht jede Zelle des Laubblattes eine Antidiffusionsarbeit, indem sie Tausendstel von Kohlensäuremolekülen aus der so stark verdünnten Mischung in der Luft anzieht, leistet nicht die Niere und das Darmepithel antiosmotische Konzentra-

tionsarbeit und scheidet nicht Niere und Parotis aus dem stark reduzierenden Blut freien Sauerstoff aus?

Es ist nicht nur längst in Tausenden von Experimenten bewiesen, daß die Zelle gewisse Stoffe entgegen den Diffusionsströmen auf ihren einzelnen Teilen anzieht und konzentriert, sondern es ist geradezu ein Kennzeichen des normalen Lebens der Zelle, wie man es beim Arbeiten mit den Vitalfarbstoffen erkennt, daß sie aus verdünnten Lösungen gewisse Atome und Atomgruppen entgegen den Diffusionstendenzen auf gewissen charakteristischen Punkten konzentrieren kann.

Solange nicht für die Lungenkapillaren ein ganz strikter experimenteller Gegenbeweis vorliegt, muß man also auch für die Lunge auf Grund der ausnahmslosen auswählenden Tätigkeit der Zellorgane der niedersten Organismen annehmen, daß die Zellen selber die Aufnahme und Abgabe der Gase leiten oder wenigstens leitend beeinflussen.

Die roten Blutkörperchen oder Erythrozyten sind elektrostatisch sehr interessante Zellen. In ihnen haben wir einen der wenigen protoplasmatischen Körper vor uns, die im reifen Zustand bei den meisten Tieren eine übersichtliche, gleichartige Struktur haben. Es fehlt ihnen, obzwar gelegentlich, — auch bei Unna, — kernähnliche Innenzonen von differenter Färbung zutage treten, an einem ausgesprochenen Kern mit Kernkörperchen und Chromatin, es fehlen ihnen alle Granula des sonstigen Zelleibes und alle Apparate für Mitosen, da sie sich normal nicht mehr teilen können. Kurz, sie sind gleichsam das Protoplasma an sich. Wenn es nun richtig ist, was einen Grundstein unserer Annahme bildet, daß das lebende Protoplasma kein Elektrizitätsleiter ist, sondern ein sehr guter Isolator, der in den dünnsten Tausendstel Millimeter messenden Schichten starke Potentialdifferenzen auseinander hält, so muß auch die rote Blutzelle ein sehr guter Isolator sein. Die Isolatornatur der Erythrozyten ist übrigens nicht nur aus allgemeinen Gründen notwendig, sondern, sofern man überhaupt auf dem Standpunkte steht, daß der Stoffwechsel auch elektrochemisch erklärt werden muß, versteht es sich von selbst, daß das Körperchen eine erhebliche differente Ladung gegenüber seiner Umgebung haben muß, was ohne ein sehr starkes Dielektrikum in jenen sehr klei-

nen Räumen undenkbar ist. Diese Ladung ist besonders in zwei Perioden des Kreislaufes unentbehrlich, beim Eintritt in die Lungenalveolen, wo sie den Sauerstoff an sich reißen und beim Eintritt in die Gewebskapillaren, wo sie ihn ziemlich rasch abgeben. In welcher Weise diese Potentiale entstehen, ob durch reibungselektrische oder influenzelektrische Vorgänge, während die 1000 Quadratmeter Fläche des Erythrozyten-Dielektrikums vor anderen dielektrischen Flächen vorüberzirkulieren wie bei einer Holtzschen Elektrisiermaschine, ob diese Potentiale chemisch entstehen durch den Prozeß des Stoffwechsels, das ist vorerst noch ganz dunkel. Nahezu gewiß ist nur, daß das Blutkörperchen auf sich Ladungen kondensiert und daß es dank diesen Ladungen in gewissen Augenblicken starke Adsorptionskräfte für Sauerstoff und für Kohlensäure erkennen läßt.

Von der bisher vorliegenden experimentellen Literatur ist es für unsere Frage von Interesse, ob die Leitfähigkeit (noch besser wäre die direkte Dielektrizitäts-Konstante) der Erythrozyten bereits untersucht ist. Das ist glücklicherweise der Fall und alle Experimente stimmen darüber überein, daß der Leitungswiderstand der roten Blutkörperchen ein unerwartet großer ist.

Übereinstimmend fanden Stewart,*) Tangl und Bugarszky**) und Roth,***) daß die Blutkörperchen den Strom ganz schlecht leiten, so daß infolge ihrer nahezu vollständigen Leitungsunfähigkeit das Volumen der Blutkörperchen im Serum nahezu vollständig genau dem Leitfähigkeitsverlust des Gesamtblutes entspricht, und man darnach eine zuverlässige Methode zur Bestimmung des Volumens der Blutkörperchen aufbauen konnte. Die einzige Zelle also, die keine Saftbahnen, keine Scheiden, keine Teilungsapparate enthält, ist also zuverlässig ein elektrolytischer Nichtleiter. Dieses Resultat steht vollkommen fest, wenngleich es nicht gelang, die letzten Serumreste zwischen den zentrifugierten Zellen ganz zu entfernen und jede Wasserverdünnung die Blutkörperchen durch Hämoglobinaustritt zerstören würde.

Man hat also mit der wichtigen Feststellung zu rechnen, daß

---

*) Zentralbl. f. Physiol., 7. Aug. 1897.
**) Vortrag i. d. physiol. Gesellschaft, Berlin, 9. Juli 1897.
***) Zentralbl. f. Physiol., 10. Juli 1897, zitiert nach Hamburger.

die roten Blutkörperchen, von denen wir wissen, daß sie zahlreiche Elektrolyte enthalten, z. B. Kalium, Chlor, Phosphorsäure und von denen allgemein angenommen wurde, daß sie aus einer Gerüstsubstanz und aus einer Flüssigkeit beständen, folgende Leitfähigkeiten ausweisen:

Pferd	$1{,}57 \times 10^{-8}$
Hund	$2{,}04 \times 10^{-8}$
Katze	$2{,}07 \times 10^{-8}$

welche noch kleiner ausgefallen wäre, wenn man das letzte Serum zwischen den Blutkörperchen hätte vollständig entfernen können.

Demgegenüber ist die Leitfähigkeit des Serums zwischen 97,6 und $122{,}0 \times 10^{-8}$ also 50 bis 80 mal so groß.

Die Vorstellung einer von einem Elektrolyten imbibierten Gerüstsubstanz ist mit diesen Leitfähigkeitsmessungen unvereinbar. Es folgt daraus im Gegenteil mit Notwendigkeit ein elektrisches Strukturbild, wonach die Ionen nicht gleichmäßig dissoziiert, sondern irgendwie eine charakteristische arteigene Verteilung haben müssen, also entweder im Zentrum oder an der Peripherie durch eine arteigene Ladung auseinander gehalten sein müssen. Diese Leitfähigkeitsbestimmungen stellen uns ein flächenmäßiges Auseinanderhalten der Elektrizitätsladungen vor Augen mit einem stark isolierenden, also ionenfreien Dielektrikum als Hauptmasse dazwischen. Es ist genau jenes Bild, welches Unnas*) Färbung der Sauerstofforte uns tatsächlich zeigt.

Wir sind also zu der Behauptung berechtigt, daß die einzige uns bekannte Protoplasmamasse ohne Vakuolen, Saftbahnen, Kern und Granula, daß diese Masse der roten Blutkörperchen sich als ein vollkommener Isolator erwiesen hat bis zu jener Grenze, die durch die Versuchsbedingungen gegeben war. Hamburger glaubt, daß durch das vorherige Auswaschen der Erythrozyten mit Zuckerlösungen, wobei ein Hämoglobin-Austritt nicht erfolgt, noch eine kleinere Leitfähigkeit konstatiert werden könnte. Nach den mitgeteilten Bestimmungen dürfen wir also erwarten, daß das Blutkörperchen sich als Nichtleiter, als Dielektrikum, verhält und daß es durch den Kreislauf, wenn durch nichts

*) S. Seite 112 dieser Schrift.

anderes, so durch die Reibung oder Influenz mit anderen Nichtleitern des Organismus, regelmäßige Ladungen erhalten dürfte.

Einen Ueberblick über die Ladungen der Erythrozyten durch Experimente zu erhalten, dürfte keine leichte Aufgabe sein. An Unnas Gefrierschnitten kann man einen außen anodischen Ladungszustand erkennen, es ist aber wahrscheinlich, daß seine Blutkörperchen vor dem Gefrieren abnormal sauerstoffarm oder nahezu erstickt waren. Es wäre von sehr großem Interesse, wenn ein geschickter Experimentator ein ganz frisches, zuverlässig sauerstoffreiches Blut zum Gefrieren bringen und mit Unnas Methode behandeln würde. Die Vermutung liegt nahe, daß sich in diesem Zustand eine andere Verteilung der Sauerstoff- und Reduktionsorte, also Anoden und Kathoden des Erythrozyten erkennbar machen würde.

Unna bringt in seiner Studie über „Sauerstofforte und Reduktionsorte“*) zwei Bilder einer Kaninchenlunge, die wohl keine Details über arterielle und venöse Blutkörperchen enthalten, aber in dem allgemeinen Bau des Organs einen gewissen Gegensatz elektropolarer Natur erkennen lassen, die die oben ausgesprochene Vermutung, daß die Blutkörperchen an elektrisch different geladenen Flächen vorbeizirkulieren, wenigstens für die Lunge als nicht ganz unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Die beiden Bilder zeigen den Gegensatz der Färbung mit reduziertem, farblosem Methylenblau auf Sauerstoff und mit Kaliumpermanganat auf die entgegengesetzten Reduktionsorte. Auf dem RWBilde des Gefrierschnittes einer frischen Lunge tritt die Hälfte eines querdurchschnittenen Bronchiolus (br) durch feine Dunkelfärbung auffallend hervor. Ebenso ist der Lymphfollikel (fo) tiefblau gefärbt.

Zu diesen hier abgebildeten Sauerstofforten des Bronchialsystems gesellen sich noch, wie andere Schnitte zeigen, in der Schleimhaut der kleineren und größeren Bronchien tief gefärbte Schleimdrüsen und Knorpelplatten.

Das Alveolargewebe birgt nur in den Kernen der Epithelien und Kapillarendothelien einen beschränkten Vorrat von Sauerstoff. Noch blasser ist die Wandung der durch den Schnitt getroffenen großen Pulmonalvene (pul); hier sind nur die Kerne

*) P. 139.

der Endothelien und der glatten Muskeln der Media schwach gefärbt.

Der Nachbarschnitt durch dieselbe Kaninchenlunge mit Permanganat zeigt genau die umgekehrte Reihenfolge der Abtönung. Von dem Gesichtspunkt betrachtet, daß die RW (Rongalitweiß-Methylenblau - Färbung) Anoden ausfärbt und Permanganat Kathoden, hat es also nach diesen beiden in ihrem Gegensatz so vorzüglich übereinstimmenden Bildern den Anschein, als ob die Blutkörperchen, die mit Kohlensäure beladen

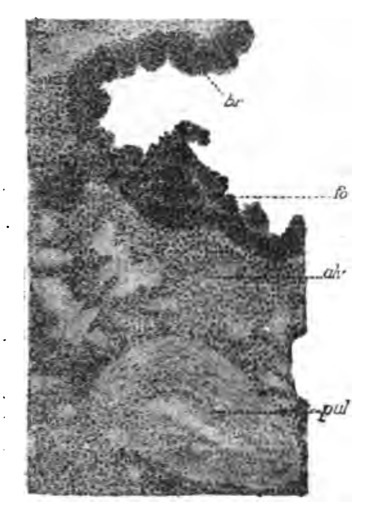


Fig. 23. Kaninchenlunge, RW.

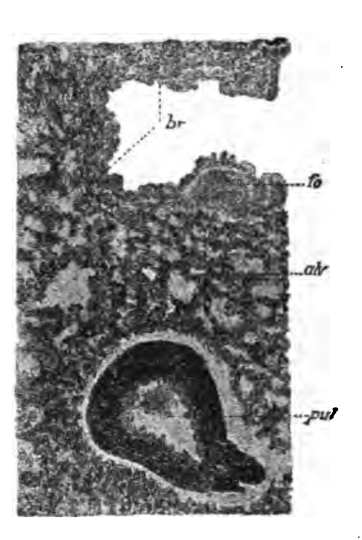


Fig. 24. Kaninchenlunge, Manganbild.

in der Lunge ankommen, elektrisch gegensätzlich geladene Zellwände vorfinden wie in der Pulmonalvene, wo das inzwischen mit Sauerstoff beladene Blutkörperchen an stark elektronegativen Potentialflächen vorüberzirkuliert.

Das ist aber gerade das, was die Annahme der auch elektrisch beeinflußten Zellreaktionen fordert, daß nämlich ein Blutkörperchen, das sich der Kohlensäure entäußert und Sauerstoff überraschend schnell und gierig an sich zieht, in diesem Augenblick ein anderes, sehr wahrscheinlich, konträres elektrostatisches Feld um sich hat als in jenem Augenblick, in dem es Kohlensäure auf sich zieht und Sauerstoff aus dem Oxyhämoglobin entläßt.

GLOMERULI UND TUBULI CONTORTI.

Obzwar ich die Nierenarbeit schon in einem früheren Kapitel besprochen habe, muß ich auf dieses Organ nochmals zurückkommen, da ich während des Druckes der ersten Bogen Gelegenheit erhielt, eine frische Kaninchenniere mit dem Berlinerblau-Verfahren zu untersuchen.

Unter den Beobachtungen, die mir erst viel später zur Kenntnis kamen, als ich meine Voraussagungen machte, und die infolge ihrer Uebereinstimmung mit meinen Forderungen mich in meinen Ideen bekräftigten, war der Einblick in die Nierenarbeit für mich mit am überzeugendsten. Ich habe schon 1912 in den „Elektrostatischen Zellkräften" geschildert, daß ich im Glomerulus der Niere eine Anode vermutete, die das Blut mit Sauerstoff beladen mußte, es paßte mir deshalb gar nicht, daß das Blut aus dem Glomerulus direkt in die Venen übergehen sollte, wie es in einer alten Physiologie von Huxley, die ich besitze, beschrieben war. Es hat mich schon damals sehr gefreut, daß ich beim Nachschlagen der Nierenhistologie die Sicherheit gewann, daß das Blut des Glomerulus nochmals in ein Kapillarnetz überging, bevor es venös wurde, wozu später noch die Tatsache kam, daß das Nierenblut die arbeitende Niere hellrot verläßt.

Natürlich war es für mich eine angenehme Überraschung und die direkte Veranlassung, meine so aussichtslose und erfolglose Arbeit fortzusetzen, als Prof. Unna zwei Jahre später, nach Ausarbeitung seiner Methode der Sauerstofforte den Glomerulus der Niere sozusagen als klassischen Sauerstofffort beschrieb, ebenso das Epithel der Tubuli contorti als Reduktionsort, wie ich ihn ebenfalls vorausgesagt hatte, ferner die Knäueldrüse der Haut als Sauerstoffort, ebenfalls 1912 von mir vorausgesagt.

Ich habe schließlich alle Bücher über Nierenphysiologie und Nierenhistologie gesammelt, die im Buchhandel erhältlich waren, da die Prager Universitäts-Bibliothek nur eine ganz lückenhafte Zeitschriftenübersicht erlaubt. Aber in allen Schriften und Büchern, in allen physiologischen Handbüchern, fand ich nichts als die schon erwähnte, für meine Hypothese hocherfreuliche physiologische Feststellung, nämlich, daß das Venenblut aus der

Niere hellrot (also arteriell) abfließt, etwas, was ebenfalls nach meiner Voraussage zu erwarten war und was ich zufällig in Heidenhains „Plasma und Zelle“ fand, welchem Buche ich zu tiefer Dankbarkeit verpflichtet bin. (II., 2, p 1021.) In diesem Buche eines Morphologen heißt es: „Der Sauerstoffbedarf der Niere ist jedenfalls groß . . . Dem entspricht, daß normalerweise das Blut sehr schnell durch die Nieren zirkuliert, so schnell, daß das Nierenvenenblut hellrot erscheint, ähnlich dem Arterienblut“.

Die Tatsache ist naturgemäß sehr richtig, die Motivierung wahrscheinlich aber unrichtig. Denn wie soll man sich vorstellen, daß dasselbe Herz die doppelten Widerstände der zweifachen Kapillarisierung in der Niere schneller überwindet als die einfachen Kapillaren der übrigen Körperteile. Nein, diese ganz singuläre Beobachtung, die in meine Hypothese und in meine Voraussagung so schön hineinpaßt, ist die Folge davon, daß das Nierenblut zweimal mit Sauerstoff beladen wird, einmal wie alles sonstige Arterienblut in der Lunge und ein zweitesmal im Glomerulus der Niere, den alle Färbungen und auch die Richtung seiner Wasserbewegung übereinstimmend als typische Anode erkennen lassen, also als Sauerstoff-Produktionsort.

Das Ergebnis der vitalen Färbungen an der Niere stimmt genau mit dem Schema Anode-Glomerulus Kathode-Epithel der Tubuli contorti, gesehen von der Seite der Kanälchen. Es ist denkbar und sogar ziemlich wahrscheinlich, daß von der andern Seite, von der Blutseite, die Glomeruli kathodisch polarisieren und die Epithelien der gewundenen Kanälchen anodisch, wenn die elektrischen Apparate der Niere analog den elektrochemischen Zellen der heutigen Technik gebaut wären. Wenn aber dies der Fall sein sollte, so ist der Aufbau auf keinen Fall so einfach schematisch, sondern durch die Zwischenschaltung zahlreicher kompliziert elektrisch differenzierter Zellen und Gewebe auf der Seite der Blut- und Lymphwege nach den bisher vorliegenden Tinktionen nicht zu übersehen.

Schoppe*) hat in den gewundenen Harnkanälchen der Blindschleiche feine Harnsäurekonkremente entdeckt, viele ältere Autoren haben Farbstoffe ausgesprochen anodischen Charakters

*) Schoppe. Die Harnkügelchen bei Wirbellosen und Wirbeltieren. Anatom. Hefte, 7. Bd. 1897.

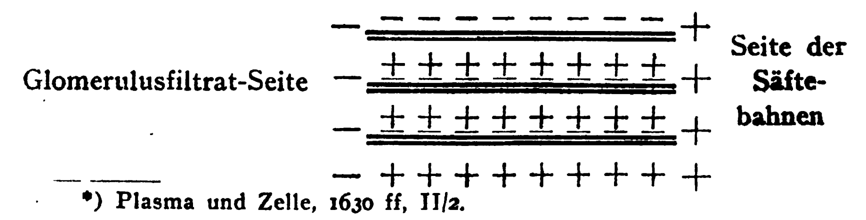


z. B. indigoschwefelsaures Natron an diesen Stellen abgelagert gefunden, was elektrisch nur dann möglich wäre, wenn auch von der Seite der Säftebahnen her (also anodisch) Ionenwanderungen vorkommen würden.

Gelegentlich findet sich auch bei Unna ein Befund, der auf den ersten Blick nicht zum Elektrochemismus der Tinktionen zu passen scheint, daß er nämlich nach vorhergehender Fixierung inverse Sauerstoff- und Reduktionsorte ausfärbte. Der aufmerksame Leser dieser Betrachtung wird von dieser Tatsache nicht überrascht sein. Bis auf gewisse Ausnahmen bei Spezialgeweben muß nach dem Grundsatz des akkumulatorischen Konträrprinzips der Lade- und Entladerichtung bei den Zellen erwartet werden, daß sie sich nach vorheriger Fixierung (Tötung) invers entladen und färben.

Nicht der selbstverständliche Fall der inversen Färbung nach dem Zelltod, der eigentlich die Anhänger der rein chemischen Tinktionshypothese längst hätte entmutigen müssen, ist aufzuklären, sondern der keineswegs seltene Fall, daß z. B. Achsenfasern der Nerven sich lebend und tot mit Methylenblau kathodisch färben.

Wer sich in das Problem einigermaßen vertieft, wird bald erkennen, daß es keineswegs einfach ist. Auch die fortschreitende morphologische Untersuchungsarbeit zeigt, daß die Gewebe bislang immer noch viel zu einfach und schematisch beschrieben worden sind. So haben beispielsweise die jüngeren Arbeiten von M. Heidenhain, Nicolas und Sauer*) ergeben, daß die sogenannte „Stäbchen"-Struktur des Epithels der gewundenen Nierenkanälchen möglicherweise eine Lamellenstruktur ist, das heißt also, daß die oben beschriebenen Ausfällungen aus Blut und aus Glomerulus-Filtrat zwischen Blättern hindurchtreten müssen, die nach den feinsten Tinktionen konträre Elektrizitätsladungen erkennen lassen, das Epithel der Tubuli contorti würde sich sonach elektrisch etwa folgendermaßen grob schematisieren lassen:



*) Plasma und Zelle, 1630 ff, II/2.

Es würde also ein elektroosmotisch erzeugter Wasser-Resorptionsstrom zwischen entgegengesetzt geladenen oder durchströmten Elektroden hindurchpassieren und eine Konzentrationsarbeit verrichten, vielleicht auch eine gleichzeitige Reduktions- und Oxydationsarbeit, über deren Mechanismus es gegenwärtig zwecklos ist, Hypothesen aufzustellen.

Dieses Schema ist rein beispielsmäßig angeführt, um die Kompliziertheit eines verhältnismäßig einfachen und gut untersuchten Resorptionsmechanismus im elektrisch differenzierten Lamellen-Epithel der Niere (ebenso des gleichfärbbaren Darmes) anzudeuten.

In Wirklichkeit wird sich das Zusammenarbeiten von elektrostatischen Ladungen mit galvanischen Kräften und mit chemischen und osmotischen Polarisationsströmen noch viel verwickelter gestalten müssen; jede Verbesserung der mikroskopischen Technik lehrt uns neue Kompliziertheiten der morphologischen und chemischen Differenziertheit kennen, die nach meiner festen Ueberzeugung entweder von elektrischen Richtkräften überhaupt hervorgerufen sind, ganz sicher aber, zumindest sekundär, mit elektrischen Potentialdifferenzen, vielleicht auch mit Strömen, untrennbar verknüpft sind. Zumindest sekundär, als Folge chemischer Affinitäten, müssen infolge der großen Nähe der Zellteile ziemlich beträchtliche elektrische Potentialdifferenzen entstehen, die naturgemäß in der üblichen Weise mit einem makroskopischen Galvanometer nicht zu messen sind.

Nun hat meine Mitarbeiterin, Fräulein Winternitz, im Juli 1917, zuerst an Mäusenieren, versucht, das Unna-Bild mit Berlinerblau zu erzeugen, einmal kathodisch, einmal anodisch. Das Arbeiten mit feinen Gefrierschnitten glückte jedoch nicht, es kam überhaupt kein deutliches Bild heraus, weder ein positives noch ein negatives. Meine eigene Methode war technisch noch nicht fertig, aber auch die Rongalit-Methode Unnas kam nicht heraus, sei es, weil nur schlechtes Kriegsmaterial von Rongalit erhältlich war, sei es, weil die Technik schwierig ist. Anfang Dezember, nachdem ich inzwischen besser gelernt hatte, das Material zu behandeln, erhielt ich eine ganz frische Kaninchenniere. Die Niere wurde mit der Hand geschnitten, wobei zwar bei so weichem Gewebe dicke Schnitte entstehen, die aber doch, zumindest am Rande, durchscheinend zu sein pflegen. Da

mir das Antrocknen zu lange dauerte, ergriff ich einen kathodisch gefärbten Schnitt (mit Eisenchlorid), wusch ihn ein wenig ab, gab ein Deckgläschen mit Ferrozyankaliumlösung darauf und brachte es unter das Mikroskop. Sogleich zeigte sich, daß ich das Permanganatbild Unnas vor mir hatte: blaue Tubuli und — dazwischen ausgespart — die hellen Glomeruli, von denen sich nur ein Randkreis, die Tunica propria gefärbt hatte, die auch auf manchen Reduktionsbildern Unnas hervortritt.

Das vollständige Trockenwerden der klebrigen dicken Schnitte konnte ich nicht abwarten, sondern habe rasch die Glyzerinlösungen mit dem zweiten Reagens auf die Objekte gegeben. Das Kathodenbild stimmte genau mit dem gewaschenen Präparat, blaue Tubuli contorti und Membrana propria, helle Glomeruli. Das Anodenbild war farblos bis auf die rötlichblauen Glomeruli, die von Farbentüchtigen für rot erklärt wurden bis auf einen Glomerulus, der sich gebläut hatte, was aber auch ein Niederschlag in den vertieften Mulden sein konnte. Ich muß diesen Versuch noch wiederholen, vermute aber aus der Erfahrung mit anderen Präparaten, daß es mir gelingen wird, nach dem ersten nicht sehr klaren Anodenbild auch noch scharfe Bilder zu erzeugen, bei denen das Blau auch für Nicht-Rotblinde hervortritt. Jedenfalls ergibt sich aus dem Kathodenbild im Zusammenhang mit dem übereinstimmenden Reduktionsbild Unnas und dem Kaliumbild Mac Callums, die wichtige physiologische Tatsache, daß das wichtigste flüssige Körperexkret, der Harn, zwischen einem starken negativen Pol und einem positiven oder doch weniger negativem Pol elektrolysiert den Organismus verläßt.

Mitte Dezember erhielt ich eine frische Meerschweinchen-Niere, die aber auch kein Anodenbild in dem gewünschten Sinne brachte, sondern anodisch ganz farblos blieb, während im Kathodenbild neben den ausgesparten farblosen Glomeruli auch drei blaue Glomeruli erschienen, wahrscheinlich ebenfalls Niederschläge von Metallkationen, die aus den Mulden nicht abfließen konnten.

Dieser Versuchsausfall, den ich noch zu ergänzen hoffe, und zwar mit konzentrierteren Ferrozyanlösungen, wobei die schwierigen Anodenbilder oft erst deutlich zu machen sind, hat mich aber doch sehr befriedigt. Meine Berlinerblau-Methode

gibt bisher nur auf der Kathodenseite (zuerst mit Eisenlösung) voll befriedigende und durch Auswaschen von zufälligen Niederschlägen zu befreiende Resultate. Das Anodenbild ist immer wegen der stark überwiegenden Kathodizität lebender und auch schon absterbender Zellen unsicher, verändert sich fortwährend etwas durch die Abstoßung des immer noch anodischen fertigen Berlinerblaus auch von kathodischen, im Absterben schwächer polarisierender Zellteile, so daß selbst bei Präparaten, bei denen das anodische Kontrastbild immer klar herauskommt, nach einem Dützend guter Bilder die Sache nicht mehr klappen will.

Im Zusammenhang mit vorliegenden älteren rein chemisch gedachten Experimenten ist es jedoch ganz sicher, daß die Tubuli Kathoden sind und die Glomeruli Anoden. Ich rekapituliere, daß ich diese beiden Elektrizitätspole 1912 an diesen Punkten vorausgesagt habe, daß Unna sie ohne Kenntnis meiner Behauptung an genau diesen Punkten 1915 findet, daß alle seitherigen Lebendfärbungen damit übereinstimmen.

Nun wende ich mein Berlinerblau-Verfahren darauf an und erhalte, wie erwartet, das Bild von Unnas Reduktionsorten als Reduktionsbild, das von Unnas Sauerstofforten noch nicht sicher, aber sehr wahrscheinlich, als Anodenbild. Ich glaube nun berechtigt zu sein, mein Kathodenbild als ein vorwiegend aus elektrischen Kräften erzeugtes zu betrachten.

Ich wiederhole nochmals die Feststellung, daß die wichtigsten flüssigen Exkrete des Körpers, Harn und Schweiß (letzterer nach Unnas Bildern der Knäueldrüsen), den Organismus durch ein Tor verlassen, in dem sie zwischen Kathoden und Anoden elektrolysiert werden. Die Analogie mit den gasförmigen und festen Exkreten ist naheliegend, schließlich auch die Analogie mit der Aufnahme flüssiger und gasförmiger Stoffe durch die lebenden Zellen. Wissen wir doch, daß jede spezielle Tätigkeit der hochentwickelten Organe höherer Tiere gewöhnlich von den niederen Zellen in einfacherer Form ausgeübt werden kann. Die elektrochemische Bearbeitung der Säfte im Harnapparat und Schweißdrüsenapparat wird wohl kaum eine einzigartige Ausnahme in der Stoffverarbeitung sein.

Leider habe ich bisher keinen lebendfrischen Verdauungskanal im Augenblick der Drüsensaft-„Ausscheidung" untersuchen können. Bis dies mir oder einem andern glücken wird,

muß sich erweisen, daß die Stoffaufnahme im Verdauungskanal die elektrolytische Mitwirkung von Kathoden und Anoden ebensowenig entbehren kann wie die Stoffabgabe auf der anderen Seite des Säftekreislaufes.

ZUSAMMENFASSUNG.

Im ganzen hat mich das Resultat der Berlinerblau-Methode bei den tierischen Objekten enttäuscht. Mit wenigen Ausnahmen läßt sich tierisches Gewebe nicht lebend schneiden und am Gefriermikrotom waren sowohl Kathoden- als Anodenfärbungen matt. Ich hatte infolge der Kriegsverhältnisse sehr wenig Material und hatte es nicht zu einer Zeit, wo ich es so hätte bearbeiten können, wie ich es gewünscht hätte.

Lebend schneiden ließen sich Knorpel (von Tauben und Fischen). Die Kathoden zeigten deutlich den Kontrast zwischen Anoden und Kathoden und es stimmten beide Bilder mit Unnas Reduktionsorten bezw. Sauerstofforten. Hingegen haben mich Muskel- und Nervenbilder enttäuscht, ich erhielt zumeist Färbungen, die Niederschlägen ähnlich sahen oder keine sicheren Linien erkennen ließen. Ich machte auch Flächenschnitte der Oberhaut, von Nägeln, untersuchte Haare, alles ohne deutlichen Erfolg. Ferner untersuchte ich solche durchsichtige Gewebe, welche sich ohne Schneiden mikroskopieren lassen, z. B. Froschzunge und andere durchsichtige Froschgewebe. Aber diese zeigten dieselbe Erscheinung wie jene Pflanzengewebe, die ich anfangs in ihren natürlichen Oberflächen-Membranen untersucht hatte, sie ließen äußerlich wenig elektrische Potentialdifferenzen erkennen und am Eindringen in das Zellinnere hinderte die Salzlösung die starke, fast immer kathodische Polarität des Zellinneren. Nur Kationen gehen im allgemeinen in das Innere von lebenden, normalen Zellen beim Liegen der Präparate in einem Reagens, solange die Zellen ihre natürlichen Membranen noch ungeschädigt besitzen. Ob es sich um Farbkörper handelt, bei denen diese Erscheinung längst beobachtet ist, oder um farblose Ionen, das ist natürlich ganz egal.

Blutkörperchen vom Frosch haben trotz ihrer natürlichen Oberfläche Kontrastbilder ergeben, die auch mit Unna zu stimmen schienen.

Eine allgemeine Erscheinung, die auch an unverletzten Tierzellen, an Schnitten und an Gefrierpräparaten auffiel, war, daß nicht bloß die Kationen angezogen, sondern die Anionen nahezu ausnahmslos abgestoßen wurden. Es bildete sich jener bekannte anodische Hof, der im Pflanzenteil ausführlicher besprochen ist.

Zusammenfassend möchte ich feststellen, daß Kontrastbilder tierischer Kathoden und Anoden mir bis jetzt nur bei Knorpeln und roten Blutkörperchen vom Frosch gelungen sind, und daß die Nierenfärbung mit Unna zumindest beim Kathodenbild übereinstimmt, daß ferner sicher das Innere der untersuchten vegetativen Zellen kathodisch ist gegen die natürliche Oberfläche und daß die Präparate im ganzen anodisches Berlinerblau abstießen. Zweifellos sind Nerven, Muskeln, wie überhaupt fast alles vegetative Gewebe, überwiegend kathodisch, meine Hoffnung jedoch, daß angeschnittene Nerven sich im Kathodenbild blau aus der Umgebung abheben würden, hat sich bisher nicht erfüllt.

Ich habe beobachtet, daß auch in tierischen Präparaten (entsprechend der Querschnitt-Negativität der Elektrophysiologen) aufgeschnittene Zellen sich kathodisch färben gegenüber der natürlichen Oberfläche. Meine Mitarbeiterin, Frl. Winternitz, die viel mehr tierische Objekte mit Berlinerblau untersuchte als ich, findet diese Beobachtung nicht zutreffend.

Als allgemeine Regel hat sich ferner bestätigt, daß die toten Gewebe, oder nicht protoplasmatischen Gewebe, Knorpel, Knochengrundmasse, Haare, abgestorbene Epidermisschichten, Nägel, weniger kathodisch sind als Zellen mit lebendem Protoplasma. Aus dem Ausfall der rein chemisch gedachten Tinktionen ist mit Sicherheit zu schließen, daß die Kerne der Eizellen und der Ganglien, die chemisch als chromatinarm charakterisiert werden, relativ anodisch sind, ausgenommen die Nukleoli. Eine Bestätigung oder Widerlegung dieser Vermutung durch die Berlinerblau-Methode gelang mir nicht.

Der Kern der übrigen Zellen oder richtiger sein Basichromatin ist höchstwahrscheinlich kathodisch. Auch über die Elektropolarität der Kernes konnte mein grobes Verfahren keine sichere Auskunft geben.

Einige Kerne färbten sich kathodisch, die meisten blieben farblos.

Ich bin dessen sicher, daß mein Berlinerblau-Verfahren zuverlässig Kathoden anzeigt, vielleicht nicht alle, weil der Schnitt sie nicht regelmäßig trifft und weil langlebige, im zweiten Reagens noch stark kathodische Zellteile, z. B. Kernchromatin, vielleicht auch noch nach geraumer Zeit das zur Blaufärbung notwendige Ferrozyan abstoßen, dagegen bin ich keineswegs sicher, daß meine Anoden wirklich Anoden sind. Ist es schon in der reinen Physik fraglich geworden, ob überhaupt physikalische Anoden im alten Wortsinne existieren, oder ob sie nur relativ unkathodische Punkte sind, die unter dem Einfluß benachbarter Kathoden negative Energiewirkungen erkennen lassen und dadurch positive Kräfte vortäuschen, so ist diese Relativität noch naheliegender bei meinen Zell-Anoden, die bei Pflanzen und Tieren gleichermaßen sich nur ganz schwach und unsicher manifestieren.

VERSUCHE AN PFLANZEN.

PFLANZLICHE ATMUNGSZELLEN.

Die Versuche, die tierische Atmung, wobei das Hämoglobin an kohlensäurereiche Luft Kohlensäure abgibt und von ziemlich sauerstoffarmer Luft Sauerstoff wieder aufnimmt, mit mechanischen Diffussionskräften in Einklang zu bringen, haben, wie ich glaube, keinen Physiologen voll befriedigt, außer vielleicht die Urheber dieser Annahmen. Es wird wahrscheinlich noch lange dauern, ehe man bei der schweren Zugänglichkeit und der hohen Empfindlichkeit tierischer Atmungsorgane wird daran denken können, der Frage experimentell näher zu treten. Dagegen schien es mir anfangs leichter, das Problem bei der Pflanze anzufassen, deren Atmungs- und Transpirationsorgane sehr lebenszäh und sehr einfach gebaut scheinen und im Grunde die andere Seite desselben Problems bewältigen, nämlich aus einer Atmosphäre mit weniger als einem halben Prozent Kohlensäure diese auf sich zu konzentrieren und zu verarbeiten.

Die Pflanze entnimmt ihren Hauptrohstoff Kohlensäure nicht, wie man glauben sollte, aus dem kohlensäurereichen Bodenwasser, sondern, wie ganz sicher festgestellt worden ist, aus der Luft (sofern es sich nicht um Unterwasserpflanzen handelt). Ihre Eingangspforten für Kohlensâure, zugleich die Ausgangspforten für Wasserdampf und Sauerstoff sind die Spaltöffnungen, von denen manche Pflanzen Tausende und Millionen tragen. Die Spaltöffnungen bestehen gewöhnlich aus zwei symmetrischen Zellen mit verstärkten Kutikularleisten an ihrer Berührungsfläche. Bei genügender Wasserzufuhr und normalem Turgor der beiden Zellen weichen die Kutikularleisten ausein-

ander, und es entsteht zwischen ihnen ein Spalt, der die Verbindung mit der hinter den Schließzellen gelegenen Atemhöhle herstellt, die ihrerseits mit den Interzellularräumen der Chlorophyllzellen direkt kommuniziert. Der Spalt zwischen den Schließzellen wird Porus genannt. Bei Mangel an Wasser wird der Porus durch einen Mechanismus geschlossen, der nicht ganz befriedigend erklärt werden kann.

Die untere Seite eines einzigen Eichenblattes im Ausmaß von 50 cm² soll nach Kerner von Merilauns Pflanzenleben über 2 Millionen solche Spaltöffnungen, also über 4 Millionen Schließzellen tragen. Die nachfolgende Zeichnung Mac Callums*) zeigt eine Spaltöffnung nach Einwirkung von Mac Callums Kaliumreagens.

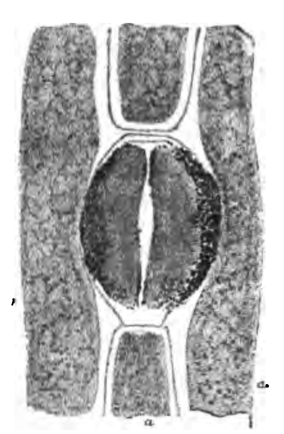


Fig. 23.

Mac Callums Kaliumreagens ist mir als eine besonders gute Methode zur Aufsuchung von Kathoden (negativen Polen) im lebenden Gewebe erschienen. Ich hatte kein Gefriermikrotom und konnte mir im Krieg auch nicht die notwendigen Reagentien beschaffen, um nach dieser Methode zu arbeiten. Aber besonders in dem vorliegenden Falle erschien es mir sehr wahrscheinlich, daß die Spaltöffnungen kleine Kathoden auf sich tragen. In diesen mußte sich elektrolytisch Kalium, vielleicht auch Natrium bilden, später natürlich die betreffenden Alkalien, die abfließen oder abdiffundieren konnten und dann aus der Luft die kleinsten Kohlensäurespuren anziehen mußten. Mac Callums Fund hat mich also im höchsten Maße interessiert.

Soweit mir bekannt, ist die Frage, ob die Eingangspforten für Kohlensäure diese zugleich auf sich konzentrieren, ob also die Schließzellen vergleichsweise pflanzliche Lungenzellen sind, noch nicht experimentell untersucht worden.

*) Ergebnisse der Physiologie. Wiesbaden 1911.

Ich behandelte zunächst dieselben Zellen mit stark verdünnten Goldchlorid- und Silbernitratlösungen. Bei sehr verdünnten Lösungen, bei denen die Schwärzung nicht allgemein ist, glückt es, die Schließzellen an genau denselben Punkten wie im vorstehenden Kaliumbild Mac Callums und nur an diesen auszufärben. Auch wenn man mit konzentrierteren Lösungen (über 1%) arbeitet, werden gewöhnlich Mac Callums Punkte, also die stärksten Kathoden geschwärzt, bevor die anderen Teile des Präparates sich färben. Dieses Resultat befriedigte mich wohl in der Hinsicht, daß gegenüber Silber und Gold sich diese Punkte unter den vielen verschiedenartigen Stoffwechsel- und Leitungszellen als die elektronegativsten Punkte des ganzen Blattgewebes heraushoben, aber ich hatte nicht vorausgesehen, daß genau dieselben Punkte wie beim Kalium herausfielen, ich hatte eigentlich die nächste Umgebung erwartet, da ich das Kalium, solange es noch direkt an der Kathode selber sitzt, nicht als Kohlensäure-anziehend ansehen konnte. Erst wenn es die Kathode verlassen hatte, konnte das Kalium oder das Kaliumhydroxyd Kohlensäure an sich ziehen. Später überlegte ich mir, daß das Kalium wahrscheinlich auch an anderen Stellen der Zelle vorhanden ist, daß es aber nach Mac Callums Methode außerhalb der Kathode nicht nachgewiesen werden kann, eben deshalb, weil Mac Callums Methode mit Kobalthexanitrit und Schwefelammonium offenbar eine kathodische Reaktion darstellt, die nur an Punkten mit einer bestimmten negativen Polarität gelingen kann. Ich hatte in diesem Falle selber vergessen an den zum Ausgangspunkt meiner Kritik der heutigen Mikrochemie genommenen Grundsatz, daß wohl die meisten mikrochemischen Reaktionen nur in einem bestimmten elektrischen Gefälle denkbar sind.

Wenn man Schließzellen in der Flächenansicht, wie sie Mac Callums Bild zeigt, unverletzt erhalten will, muß man von steifen, dicken Blättern, z. B. Hyazynthen, Lilien die oberste Hautschicht abziehen, was bei diesen Arten sehr leicht gelingt. Hiebei gelangt die glashelle Oberhautschicht mit Hunderten von Schließzellen direkt auf den Objektträger. Ich ging nunmehr daran, nachdem ich die Parallelität der Ausfärbung der Kaliumorte mit den Gold- und Silberorten festgestellt hatte, auch ne-

gativ mit gefärbten Anionen das umgekehrte Bild der kathodischen Zellen zu erzeugen.

Hiebei wurde ich jedoch enttäuscht. Wohl färben sich im allgemeinen lebende Zellen mit gefärbten Anionen etwas anders als mit gefärbten Kationen, was übrigens unter der Benennung azidophile, basophile und oxyphile Substanzen eine allen Histologen vertraute Erscheinung ist, aber die direkten Inversionsfärbungen, denen man in der Literatur hie und da begegnet, sind doch nur Ausnahmen und nicht gerade häufige Ausnahmen. Vor der letzten Periode meiner Untersuchungen habe ich dies hauptsächlich darauf zurückgeführt, daß starke elektrische Ruheladungen in ihrer unmittelbarsten Nähe influenzelektrisch entgegengesetzte statische Ladungen erzeugen, die bei der groben Sichtbarkeitsgrenze unserer Mikroskope scheinbar an denselben Punkten erscheinen wie die Primärladungen. Später jedoch, als sich zeigte, daß die Inversionsfärbungen der Wurzeln beispielsweise am deutlichsten bei schwacher Vergrößerung hervortreten, glaube ich eine bessere Einsicht gewonnen zu haben in den etwas verwickelten Mechanismus der elektrolytischen Histochemie:

Vor allem muß man sich bei der Betrachtung dieser Vorgänge davor hüten, in einen extremen Elektrochemismus zu verfallen, der den entgegengesetzten Fehler des einseitigen grobmateriellen Chemismus der alten Histochemie in sich trägt; das histologische Färbungsbild ist natürlich nicht ein reiner Ausdruck der elektrischen Ursachen, sondern eine Resultierende aus chemischen, elektrischen, osmotischen und Adsorptions-Kräften. So wie es beispielsweise niemandem einfallen kann, die blaue Jodstärke-Reaktion bei Abwesenheit der spezifischen chemischen Stoffe Jod und Stärke zu erwarten, so spielen bei fast jeder charakteristischen Färbung chemische Spezifitäten der Bindung, der Löslichkeit, der Permeabilität, der Reaktion mit anderen zufälligen chemischen Stoffen der Zelle eine Rolle.

Die Inversionsfärbung mit demselben chemischen Stoff suchte ich in der Weise zu erzielen, daß ich die Oberhaut einer Schwertlilie (Iris florentina) einmal zuerst mit Eisenchlorid und dann mit Blutlaugensalz, ein andermal zuerst mit Blutlaugensalz dann mit Eisenchlorid behandelt habe. Es sollte dasselbe Berlinerblau sich im ersten Fall an den Kathoden, im zweiten

an den Anoden niederschlagen. Es wird angenommen, daß die lebenden Zellen die herangebrachten Salzlösungen zunächst elektrolysieren, worauf das hinzukommende zweite Reagens das Berlinerblau auszufällen hat. Die Kontrastfärbung kann nur gelingen, wenn die Lösungen zugleich die Zellen töten, denn der Zutritt des zweiten entgegengesetzt geladenen Ions an die Punkte der Anziehung des ersten Ions ist unmöglich, solange die Zelle ihre elektrische Lebensladung voll behält. Im vorliegenden praktischen Beispiel zieht die überwiegend kathodische Schließzelle das Eisen des Eisenchlorids an sich. Wenn nun mit dem elektronegativen Ferrozyananion das Eisen blau fixiert werden soll, so muß die Zelle vorher ihre Lebensladung abgetötet haben, sonst würde die negative Schließzellenladung die Ferrozyananionen weiter abstoßen und nicht zum Eisen herankommen lassen. Ich benützte deshalb bei den späteren Versuchen 5 prozentige bis gesättigte Lösungen, in denen die Präparate zeitgerecht ihre Lebensladung zu verlieren scheinen.

Die kathodische Ausfällung gelang sehr rasch, sehr gut und sehr deutlich, sie stimmte gut mit der Gold- und Silberfärbung überein. Gewöhnlich kündigte sie sich schon im Anfang dadurch an, daß gleich die erste Lösung, Ferrichlorid, von den kathodischesten Punkten reduziert wurde und graubraune Oxydule absetzte. Die anodische Färbung indessen machte mir sehr große Schwierigkeiten. Es stellte sich heraus, daß die lebende Oberhaut, die in Uebereinstimmung mit den elektrophysiologischen Experimenten eine überwiegend negative Elektrizitätsladung trägt, nicht nur den negativen Ferrozyanwasserstoff nicht auf sich beläßt, sondern daß es auch nach einer kurzen Abspülung, wenn das Präparat noch Leben in sich hat, das Anion immer noch von sich abstößt, so daß nach dem Zusammenbringen mit Eisenchlorid eine Bläuung erst in einer gewissen Entfernung von dem Objekt erfolgt, das von einer farblosen Randschicht, dann von einer blauen Schicht auf dem Glase umgeben ist und sich selber nach dieser Methode nicht bläut. Nach längerem Waschen fehlt auch die Bläuung außerhalb des Objektes auf dem Glase des Objektträgers.

Es ist also die negative Oberflächenladung der Oberhaut auch nach einigen Minuten Einwirkung noch stark genug, um

das Eindringen der Anionen in die lebende Zelle zu verhindern und eine Inversionsfärbung der unverletzten Oberhaut von Irisblättern unmöglich.

Die negative Ladung der Oberhaut habe ich später, als ich die Methode der Inversionsfärbung besser beherrschte, bei Irisblättern im Querschnitt scharf herausgebracht. Die Hauptmembran der glashellen Epidermisschicht wird, wie aus den Querschnittsbildern und aus den Längsschnitten senkrecht zur Blattfläche ersichtlich, blau mit kathodischem Berlinerblau und färbt sich nicht mit anodischem Berlinerblau; sie reduziert Goldchlorid, Silbernitrat, nimmt anodisches Jod nicht an, nimmt gewöhnlich Methylenblau gierig auf und lehnt Säurefuchsin ab, ist also zuverlässig kathodisch. Wenn nun im Flächenbild der abgezogenen Oberhaut die Mac Callum-Punkte sich noch besonders abheben durch ihre starke Kathodizität, so hat man ein Recht, diesen Punkten eine sehr starke negative Ladung zuzuschreiben.

Die alleräußerste Membranlamelle (Cuticula) ist weniger kathodisch, bei den meisten Blättern und Nadeln direkt anodisch.

Ich glaube also, festgestellt zu haben, daß in den Atmungsöffnungen der Pflanzen starke negative Elektroden sitzen, die durch ihre Basenkonzentration die Kohlensäure der Luft an sich ziehen und festhalten. Ferner ist mir bei meinen zahlreichen späteren Pflanzenschnitten immer die erhebliche Kathodizität des inneren Schwammparenchyms der Blätter aufgefallen, der an die luftgefüllten Interzellularen und Atemhöhlen anschließt.

Die kathodische Ladung der Schließzellen steht für mich fest, obzwar sie wegen der gleichen kathodischen Ladung der benachbarten Epidermis nicht leicht auszufärben ist. Ich erhielt jedoch später ganz eindeutige Bilder.

Es gab zwei Wege, um doch vielleicht eine umgekehrte Färbung mit dem identischen Farbkörper zu erzielen: das Arbeiten mit Querschnitten und Längsschnitten, weil bei geöffneten, durchschnittenen Zellen ein Eindringen der geladenen Anionen vielleicht leichter erzielbar sein konnte und ebenso das vollständige Vergiften der Zellen gleichzeitig mit dem Einbringen der ersten Lösung. Die erste Methode hat anfangs gegenüber dem Arbeiten

mit geschlossenen oberirdischen Teilen der Pflanze sehr wenig deutlichere Ergebnisse hervorgebracht, sondern zumeist ganz diffuse Niederschläge, die zweite Methode hat bei den Vorversuchen ebenfalls nicht befriedigt. Rasche Vergiftungsmittel wie z. B. Sublimat geben Niederschläge sowohl mit den Reagentien als mit Eiweißlösungen der Zelle, Alkohol bringt in wirksamer Stärke Schrumpfungen hervor, ferner muß man den richtigen Moment des Absterbens genau erfassen, weil tote Gewebe naturgemäß nach einiger Zeit nicht bloß das Kation sondern auch etwas Anion aufnehmen, wenn ihre normalen Lebensladungen größtenteils sich entladen haben.

Aus meinen späteren Versuchen gewann ich die Vermutung, daß der unbefriedigende, wohl nicht ganz negative aber ungleichmäßige Ausfall meiner Vorversuche an oberirdischen Pflanzenteilen — auch bei Schnitten — damit zusammenhängt, daß der Schnitt — gleichsam durch elektrolytischen Kurzschluß — eine leitende Flüssigkeitsschicht auf das Präparat bringt und dadurch die oberste Schicht gleichmäßig kathodisch aufládt, wie dies der überwiegend negativen Ladung aller lebenden Zellterritorien und dem reduzierenden Charakter der Zellsäfte entspricht.

Ich habe Querschnitte und Längsschnitte durch die Gefäße der Schwertlilie, Begonien-Stiele, -Blätter, -Wurzeln nach allen Richtung durchprobiert, immer ohne den von mir gewünschten vollen und deutlichen Erfolg, ein reines Negativ des kathodischen Bildes zu erhalten. Dabei erinnerte ich mich, im Laufe der Jahre verschiedene Arbeiten gelesen zu haben, in denen behauptet wurde, daß die Pflanzen Kathodenstrahlen aussenden, die entladend wirken. Sicher ist es, daß, wenn überhaupt Anoden auf oberirdischen Pflanzenteilen vorkommen, diese sehr schwach sind oder sehr wenig zahlreich. Die Pflanzen und in der Regel alle lebenden Zellen zeigen, wie ja auch die jahrzehntelange Experimentalarbeit der Elektrophysiologen ergeben hat, nur negative Ladungen von einiger Stärke, die sogenannten „positiven" Schwankungen scheinen, abgesehen von ihrem nicht eben häufigen Vorkommen, nur Abnahmen der Negativität zu sein, die im Strombild positiv erscheinen. Wer sich mit dem Problem der mikroskopischen Elektrizitätswirkungen näher befaßt, wird ebenso wie die Elektronenforscher darauf geführt werden, daß

es nur eine Elektrizität, die negative, gibt und daß unsere „positive" Elektrizität nichts anderes ist als eine gedankliche Abstraktion von rein mathematisch-theoretischem Interesse. Positive Elektronen sind nach 20jähriger intensiver Forschungsarbeit bisher nirgends entdeckt worden. Sie existieren eben nicht.

Ich habe mir, weil es zu falschen Bildern führt, abgewöhnt, die Elektrizitäten als „positiv" und „negativ" zu bezeichnen. Die Bezeichnungen „kathodisch" und „anodisch" erscheinen mir zutreffender.

Bei den Versuchen mit Berlinerblau störte es sehr, daß bei vielen Zellen Eisensalze allein schon Ausfällungen machen, teils durch einfache Reduktionen parallel mit der Gold- und Silberausfällung, (es scheint Eisenoxydul und Eisenhydroxyd auszufallen), teils ergeben sich durch das Zusammenbringen mit gerbsäurehaltigen Zellen tintenartige Färbungen. Ich versuchte analoge Ausfällungen, wie bei Berlinerblau, mit Bleizucker und Kaliumbichromat und das Chromgelb einmal kathodisch, einmal anodisch zu erhalten. Auch diese Methode gab keine deutlichen Resultate. Chromsäure wirkt, wie bekannt, stark giftig auf alle Zellen und bevorzugt bestimmte Zellelemente, u. zw. anscheinend nicht bloß aus elektrischen Ursachen. Auch wird es durch die Reduktionskraft der chemischen Nebenprodukte gewisser Zellkathoden offenbar ähnlich wie das analoge Kaliumpermanganat reduziert, worauf es Kathoden statt Anoden anzeigt. Später habe ich mit gelbem Jodblei gearbeitet.

Auch mit Kaliumpermanganat habe ich viele Objekte behandelt, wobei ich zumeist braune Ausfällungen an jenen Orten erhielt, die ich nach übereinstimmenden anderweitigen Färbungen als Kathoden anspreche, z. B. auch an den Kaliumorten Mac Callums.

Daß Kaliumpermanganat auf frischen Objekten nicht azidophile Orte ausfärbt, sondern meist basophile, also solche, die sich im allgemeinen mit Farbbasen färben, nicht mit Farbsäuren, wie es die Uebermangansäure zweifellos gegenüber dem farblosen Kali ist, zeigt klar, daß die alte beschränkt chemische Vorstellung der säureanziehenden Basen und der basenanziehenden Säuren für die lebenden Zellen nicht ausreicht. Hier haben wir eine farbige Säure vor uns, die gewöhnlich nur an solchen Orten

ausfällt, wo sie nach den Resultaten der Teerfarbstoff-Tinktionen nur Säuren antreffen müßte. Tatsächlich aber sind diese Orte nicht Säureorte, sondern sie sind Kathoden, negative Pole, die einerseits wohl Basen an sich ziehen, aber sich von der bloßen chemischen Affinität dadurch unterscheiden, daß sie zugleich starke Reduktionswirkungen erzeugen. (In der elektrolytischen Zelle wird von der Kathode gewöhnlich naszierender Wasserstoff ausgeschieden, der stark reduzierend wirkt.)

Die Versuche mit Kaliumpermanganat ergeben also auch einen zwingenden Hinweis, daß die basenanziehenden Punkte der lebenden Zelle negative Pole, Kathoden, sind. Das Permanganat geht jedoch keineswegs in allen Fällen zur Kathode.

Bei den Atmungszellen der Pflanzen haben meine Versuche ergeben, daß sie sich mit allen kathodischen Mitteln gleichmäßig und deutlich wie in dem vorstehenden Bilde Mac Callums färben.

Ich habe bei diesen Versuchen auch auf die Zellwände geachtet. Es schien mir, daß auch bei ihnen eine elektrische Polarität zu konstatieren war, u. zw. bei den Atmungszellen eine kathodische, ich möchte dies aber nicht als gewiß annehmen, der Dichtigkeitsunterschied zwischen Zellwand und Inhalt ist groß und ein solcher Dichtigkeitsunterschied mag oft Bilder vortäuschen, die nicht auf einer spezifischen Polarität beruhen. Manchmal glaubte ich, diesen Einwand durch deutliche Umkehrungsbilder mit dem identischen Tinktionskörper beseitigen zu können. Die Niederschlagung von Anionen auf feine Teile lebender Zellen ist jedoch eine nicht ganz leichte Aufgabe.

Als ich erkannt hatte, daß es mir schwer gelingen werde, auf die stark kathodischen oberirdischen Pflanzenzellen Anionen zu konzentrieren, noch dazu bei unverletzter Zelloberfläche, probierte ich zunächst Querschnitte der Atmungszellen, der Gefäße, der Parenchymzellen der Lilie. Der Erfolg blieb unbefriedigend. Die kathodischen Reagentien klappten sämtlich gut, die anodischen wollten aber nur sehr selten ein deutliches Negativbild der kathodischen geben. Ich hatte öfter gelesen, daß Jod in den Pflanzenzellen Stärke und verholzte Zellwände ausfärben kann. Hier hatte ich ein deutliches, leicht diffundierbares, anodisches Reagens. Aber erstens konnte ich, wie an anderer Stelle geschil-

dert, die gewöhnlichen Jodstärke-Reaktionen bei vollkommen frischen, normalen Pflanzen, nicht klar herausbringen, zweitens waren die erzielten Bräunungen etwas anders aussehend als das anodische Bild, das mir aus so verschiedenartigen Anion-Tinktionen vertraut war, und es war keineswegs in allen Fällen ein direktes Negativ des kathodischen Bildes.

Nach den Oberhaut- und Schließzellen-Tinktionen der Schwertlilie prüfte ich alle anderen vegetativen Organe dieser Pflanze, dann Blüten und Knospen von Pelargonien in Längs- und Querschnitten. Es gelang mir aber lange nicht, das Inversionsbild, das manche Autoren unbeabsichtigt so oft erhalten hatten, rein und willkürlich herauszubringen.

Ich führte meine anfänglichen Mißerfolge auch auf wechselnde Elektrizitätsladungen bei ausfallender Beleuchtung oder Transpiration zurück. Wenn meine Auffassung von der Bedeutung der Elektrizitätsladung im Leben der Zelle zutreffend ist, so muß folgerichtig erwartet werden, daß eine assimilierende Pflanze in voller Beleuchtung sich anders auflädt wie eine dissimilierende, die bloß ihre Reservestoffe veratmet wie ein Tier und daß sie auf mangelnde Feuchtigkeit u. dergl. zuerst elektrisch reagiert.

DIE WURZELAUSSCHEIDUNGEN.

Schon als ich Pelargonien- und Lilienwurzeln untersuchte, schien es mir, als ob die Negative Umkehrbilder der positiven Färbung in bezug auf bestimmte Zellteile zeigten. Einen regulären Erfolg hatte ich aber erst mit Wurzeln von Ficus scandens, einer Zierpflanze, die in Blumenhandlungen erhältlich ist. Sei es, weil in dieser Pflanze die elektronegativen Zellstränge von den positiven übersichtlicher gesondert sind, sei es, weil ich vielleicht die Technik schon etwas besser beherrschte, glückten mir mit dieser Pflanze einige hübsche Versuche. Ich nahm nur solche Wurzeln, die sicher normalfrisch, nicht abgestorben oder angefressen waren, ich nahm sie bei voller Beleuchtung von gut begossenen gesunden Pflanzen, ich hatte auch schon die ungefähre Zeit weg, in der die Versuche gelingen, so daß ich gleichmäßigere Resultate erhielt.

Die Wurzel der Phanerogamen besteht aus einem Zentralzylinder mit abwechselnden Siebteilen und Wassergefäßteilen,

die in Radialstrahlen im Zentralzylinder gruppiert sind. Die Rinde meiner Wurzeln war mit Erdteilchen verunreinigt, die sich ohne Verletzung nicht wegwaschen ließen. Gleich bei den ersten Vorversuchen sah es so aus, als ob diese Wurzel sich deutlich elektrisch differenzierte, mit dem Siebteil- und der Kambiumschicht*) als Zentrum, die stark und auffällig kathodisch reagierten. Die Wurzelhaare zeigten, wenn frisch und normal bei Tageslicht behandelt, ziemlich deutlich anodische, oft aber auch kathodische Färbung.

Für diejenigen, die sich für diesen Teil der Pflanzenphysiologie bisher nicht interessiert haben, müssen hier einige Erklärungen eingeschaltet werden: die Pflanzenwurzel hat im Licht und bei normaler Bodenfeuchtigkeit zwei Haupttätigkeiten, sie nimmt Wasser aus dem Boden auf und befördert es in ihrem Xylem (bestehend aus Ringgefäßen, Spiralröhren, getüpfelten Gefäßen und Tracheiden) n a c h o b e n, sie befördert ferner in ihrem Phloem (Siebteil), Eiweiß und andere in den Blättern bereitete Nahrungsstoffe n a c h d e r W u r z e l. Der Siebteil besteht größtenteils aus Siebröhren, so genannt nach der Art der Wände, durch die diese Gefäße miteinander verbunden sind und sogenannten Geleitzellen. Die Bewegung des Wassers von der Wurzel nach 40 Meter hohen Bäumen ist eine der auffallendsten Erscheinungen der Physiologie, bei der bisher alle Erklärungen versagten, im Grunde ist aber die entgegengesetzte Bewegung des Baustoffmaterials Eiweiß, Zucker, Stärke nach unten weniger auffallend, aber ebenso unmöglich mit rein mechanischen Ursachen zu erklären.

Es liegt nahe für die elektrohistologische Untersuchung die Frage zu stellen, ob vielleicht beide Gefäßsysteme entgegengesetzte Elektrizitätsgefälle in vertikaler Richtung haben, also kataphoretisch die Flüssigkeiten dirigieren. Meine ersten Versuche galten also nebenbei dem Zwecke, eine verschiedene Elektrizitätsladung des Zellinhaltes oder der Zellwände zu konstatieren zwischen dem Siebteil einerseits und dem Holzteil andererseits, was aber endgültig nur an makroskopischen Längsschnitten zu untersuchen wäre, nicht an mikroskopischen Querschnitten. Ich schicke gleich voraus, daß ich also mit meinen bisherigen

*) Das Kambium ist eine protoplasmareiche und kernreiche Zellschicht, die durch Zellteilungen aus sich die Gefäße erzeugt.

Versuchen diese Frage nicht entscheiden konnte, der Siebteil (Phloëm) ist wohl entschieden kathodischer polarisiert, im Holzteil (Xylem) scheint der Spiralbelag der Wasserröhren anodisch oder schwächer kathodisch polarisiert zu sein, aber ich kann bisher noch nicht behaupten, daß eine entgegengesetzte elektrische Polarität der Querschnitte beider Gefäßsysteme des entgegengesetzten Stofftransportes in meinen Experimenten mit voller Sicherheit hervorgetreten ist. Die größten Wassergefäße, Ringgefäße und Treppengefäße scheinen sich amphoter zu verhalten und zeigen nach meiner Methode keine sichere Ladung.

Man muß allerdings einschalten, daß die Versuchsbedingungen zurzeit derart sind, daß eine sichere Beantwortung derartiger Fragen kaum möglich ist. Die Pflanzengefäße stehen unter negativen und positiven Drucken, wenn man sie also schneidet, fließt der stark kathodische Eiweißinhalt der Siebröhren aus und wahrscheinlich Wasser in die Tracheen und Interzellularräume. Das genügt, um eine vorhandene statische Polarität zu verdecken.

Noch eine andere Frage von allgemeinem physiologischem Interesse kommt bei elektrischen Untersuchungen an Wurzeln in Frage: nämlich ob die sogenannten „Wurzelausscheidungen" elektrolytischer Natur sind. Die Pflanzen lassen nämlich im Sonnenlicht eine sauere Reaktion ihrer Wurzeloberfläche, namentlich der Wurzelhaare, erkennen. Welcher Natur diese Säure ist, hat sich niemals mit Sicherheit feststellen lassen, sie ist aber stark genug, um Marmor anzuätzen, auf welchem Pflanzen kultiviert werden. Ich habe um 1899 die Hypothese aufgestellt, daß die Pflanzenwurzeln in der Beleuchtungsperiode als unipolare Anoden fungieren, welche Annahme von Pfeffer und den anderen Pflanzenphysiologen mit Entschiedenheit abgelehnt wurde.

Als ich die Pflanzenwurzeln auf ihre elektrische Polarität mit Farbstoffen und Salzlösungen untersuchte, bin ich auf diese alte Idee zurückgekommen, die von grundsätzlichem Interesse für die gesamte Tierphysiologie und Histochemie ist. Wenn es mir gelingen würde, nachzuweisen, daß die „säureausscheidenden" Wurzelzellen in Wahrheit Säureradikale aus der Bodenflüssigkeit absaugen, so wäre diese Frage wohl zugleich für die Fundusdrüsen des Magens mit ihrer Salzsäure-„Ausscheidung", zugleich für die Nierenzellen usw. entschieden. Wir können nicht

so leicht daran denken, den Magen der Tiere im Moment der Salzsäureproduktion so zu fassen, daß wir die Elektropositivität der Belegzellen der Fundusdrüsen mit Sicherheit feststellen können. Bei der Pflanze, die die Säureproduktion wohl viel schwächer betreibt, aber stetig und stundenlang und dabei in beliebigen Teilstückchen unabhängig von Kreislauf und Nervenzusammenhang ihre normale Lebensfähigkeit anscheinend behält, konnte man eher hoffen, die Ladungen festzustellen.

Bei den Wurzeln von Begonien, Iris florentina, Gramineen, Rettich habe ich die Anodizität der Wurzelepidermis nicht mit Sicherheit reproduzieren können, bei Ficus scandens hingegen ist die äußerste Wurzelhaut der lebenden Endstücke im normalen Zustand anodisch. Die Wurzelepidermis färbt sich deutlich mit Säurefuchsin, mit Eosin und mit anderen Tinktionen anodischen Charakters.

Die Wurzeln der meisten Pflanzen bestehen größtenteils aus den der Oberfläche nahen Strecken, deren Rinde und Wurzelhaare abgestorben und funktionsunfähig sind und aus einer kurzen Endstrecke mit lebender Epidermis und lebenden Wurzelhaaren. Es ist nicht leicht, die jüngsten Wurzelspitzen zu schneiden, die tote Rinde aber gibt unregelmäßige, launenhafte Tinktionen.

Nebenbei gesagt, ist es wenig wahrscheinlich, daß die Wurzeln nur das tun, was die Botaniker „Säureausscheidung“ nennen. Entweder in der Nacht, oder auf bestimmten Punkten auch bei Tage, müssen auch Kathoden an der Wurzeloberfläche vorhanden sein, wenn die Alkalien eindringen sollen. Ich hatte leider keine Gelegenheit, diesem interessanten Problem eingehender nachzugehen. Wenn wirklich die Wurzeln fortwährend nur Säuren „ausscheiden“ würden, so müßte der Boden eines alten Waldes ohne Wasserablauf zu einer konzentrierten Säure geworden sein. In Wirklichkeit ist dieser Boden, auf den Jahrhunderte Säuren „ausgeschieden“ haben, alkalisch!

Ich färbte zur Kontrolle des Berlinerblau-Verfahrens Querschnitte und Längsschnitte zweijähriger Wurzeln in Methylenblau, Goldchlorid einerseits und Säurefuchsin und Jodjodkalium andererseits. Es ergab sich eine sehr auffällige Uebereinstimmung der Färbung mit ihrem elektrochemischen Charakter. Bei Methylenblau (basisch, kathodisch) färbte sich die Rindenzone,

die bei diesen Wurzeln die Hauptmasse ausmacht, samt dem ringförmigen Kambium, dem Bildungsgewebe, mit Methylenblau dunkel, wobei eine sternförmige Figur sich stärker abhebt, an der Grenze gegen den inneren Holzteil hebt sich bei Methylenblau der farblose Innenkreis des Holzes scharf von dem gefärbten Kambium und Phloëmring ab.

Auch mit Goldchlorid färben sich die Rindenzonen, u. zw. zuerst gewisse stark reduzierende Zellen, die sich tangential schwarz abheben. Der Holzzylinder hebt sich bei Goldchlorid nicht so scharf farblos ab. Dieses starke, durch Reduktionsmittel sich schwärzende Reagens ist sehr giftig und lichtempfindlich und reduziert sich im toten Gewebe offenbar auch an Stellen, die im Leben anodisch sind.

Demgegenüber zeigt nun das anodische Säurefuchsin und Eosin (Tetrabrom-Fluoreszeïn) das genau umgekehrte Verhalten.

Ich habe später wieder auf dasselbe Präparat meine Lösungen Eisenchlorid und Ferrozyankalium gegeben, und zwar zuerst Eisenchlorid (kathodische Zellteile oder Zellen), dann zuerst Blutlaugensalz (anodische Zellen), die kathodische Methode gelang fast immer vollkommen, bis auf den Umstand, daß die Färbung der Wurzelepidermis wegen ihrer erdigen Verunreinigung nicht mit Sicherheit festzustellen war. Es schien öfter, als ob auch sie kathodisch gebläut würde, was nicht damit stimmt, daß sie normal Säuren produzieren sollte.

Mit vollkommener Sicherheit gelang jedoch die Ausfärbung jener scharfen blauen Linie um den Holzzylinder, die bei Methylenblau in frischen Schnitten so auffällig hervorgetreten war. Diese Versuche beweisen meines Erachtens, daß die kathodische Polarität der Rindenzone stark genug ist, Eisenchlorid zu elektrolysieren, so zwar, daß nach ganz kurzem Auswaschen (fünf Sekunden oder noch kürzer) in dem Holzkreis keine Blaufärbung mehr hervortritt.

Hiezu sei bemerkt, daß Methylenblau wegen seiner leichten Reduktionsfähigkeit in elektrischer Beziehung einer der unverläßlichsten Farbstoffe ist und aus nicht erklärlichen Gründen öfter Inversionsbilder seiner selbst lieferte, auch an demselben Schnitt einer Ficuswurzel.

An diesem Präparat habe ich eine große Reihe von Versuchen gemacht, bis ich mir eine bessere Methode mit An-

trocknung ausgearbeitet hatte, die dann auch auf die anderen, früher mißglückten Objekte angewendet werden konnte.

Die Frage der Wurzelausscheidungen konnte ich mit den Hilfsmitteln, die mir im August-September 1917 zur Verfügung standen, nicht zu einer vollen Entscheidung bringen. Es steht für mich wohl fest, daß diese „Ausscheidungen" elektrolytischer Natur sind, doch kann ich zwingende experimentelle Beweise, die den Gegner dieser Ansicht überzeugen würden, bisher nicht vorbringen.

Ich versuchte noch Ausfällungen von gelbem Bleichromat, von gelbem Bleijodid, von rotbraunem Kupferchromat, die im auffallenden Licht auf den erdigen Wurzelhaaren deutlicher hervortreten sollten, aber diese Reagentien bewährten sich nicht. Erstens sind die meisten Pflanzenschnitte von Natur gelblich oder gelbgrün, dann sind diese Lösungen sehr giftig. Auf Geweben aber, die früher absterben, ehe sie die Lösung elektrolysieren können, lassen sich kaum Elektrizitätsladungen bestimmen. Ich erhielt gewöhnlich ziemlich diffuse Ausfällungen, aus denen nichts Bestimmtes zu entnehmen war.

DIE ANODEN.

Lange Zeit war es mir nicht möglich, das schwierige, äußerst labile Anodenbild festzuhalten. Es gelang mir wohl hie und da, wenn ich in der Eile einen anodischen Schnitt nicht gut auswässerte, ganz vorübergehend ein deutliches Inversionsbild des kathodischen Berlinerblaubildes, aber dieses Bild haftete nicht, wie das kathodische, an dem lebenden Gewebe, sondern war im Augenblick, oft durch eine leise Berührung des Deckgläschens, zerstört oder anscheinend von selbst verschwunden. Es sah so aus, als ob das Präparat mit seiner Kathodizität nicht nur das Ferrozyanradikal, sondern das fertige Berlinerblau von sich abstoßen würde, wenn das Ferrichlorid als zweite Lösung an das Präparat gegeben wurde. Es wird gleichsam von dem Schnitt weggeschleudert, ganz anders wie beim Kathodenbild, bei dem das Eisen von dem Schnitt angezogen wird und der umgebende Flüssigkeitstropfen bei nicht zuviel Eisenchloridlösung eisenfrei oder nahezu eisenfrei zu sein pflegt, sich also nicht bläut. Ich brauche niemals auf meine, auf dem Objektträger nebeneinander

gelegte Präparate zu schreiben, welches das anodische und welches das kathodische Berlinerblau enthält, das sieht man schon mit freiem Auge an der farblosen Umgebung (Kathode) und dem blauen Rand (Anode) um das Präparat.

Ich hatte also schon die Inversionsbilder ziemlich scharf heraus, aber noch kein Mittel, sie auch nur kurze Zeit festzuhalten. Da erinnerte ich mich, — durch den Zufall eines angetrockneten Schnittes — an eine Angabe von Molisch bei seiner Färbung von Zuckerrübenschnitten mit Diphenylamin. Molisch gibt an, daß die Blaufärbung der äußersten Zellreihe der Rübenwurzel bei nassen Schnitten nur diffus ausfällt. Man muß den Schnitt antrocknen lassen, um die äußerste Zellreihe scharf konturiert ausgefärbt zu erhalten. Die Oxydation von Diphenylamin zu Anilinblau ist eine typisch anodische Reaktion. Molisch hat die richtige Methode angegeben, um die schwierige Anodenfärbung scharf herauszubringen. Erstens wird durch das Antrocknen der elektrische Kurzschluß beseitigt, der durch den Wassertropfen als Elektrolyten in der Schnittfläche hergestellt wird. In diesem Elektrolyten entlädt sich die schwache Anodenladung sehr bald, stößt den eventuell aufgenommenen Ferrozyanrest von sich ab, der über den Rand des Schnittes hinauswandern muß, wo ihn dann später das hinzukommende Eisenchlorid auch antrifft. Zweitens wird durch das Abtrocknen des Tropfens das Abstoßen des Ferrozyans mechanisch verhindert.

Bisher haben wenig Histologen die anodischen Färbungen an lebenden Objekten studiert. Man begnügte sich im allgemeinen mit der Feststellung, daß vorwiegend basische, d. h. kathodische Farbstoffe zur Vitalfärbung geeignet seien. Nur Unna hat mit seinen „Sauerstofforten“ auf Gefrierschnitten auch anodische Färbungen scharf herausgebracht. Als ich seine Vorschriften später daraufhin noch einmal durchsah, fand ich, daß auch er, der Tierhistologe, unabhängig von dem Pflanzenphysiologen Molisch und unabhängig von elektrischen Rücksichten, die beiden Forschern fernlagen, auf das Antrocknen der Schnitte verfallen war.

Mit diesem kleinen Kunstgriff des Antrocknens gelangen mir einige schöne Inversionen. Ich fügte später nicht mehr die zweite Tinktionsflüssigkeit in Tropfen zu, sondern benetzte ein

Deckgläschen ziemlich gleichmäßig damit und legte es dann vorsichtig, ohne es zu verrücken, auf den angetrockneten Schnitt. Dann gelang die Umkehrung des kathodischen Bildes bei geeigneten Objekten sehr gut. Wenn man jedes Abrutschen des labilen Anodenbildes verhindern will, so benützt man als zweites Reagens eine dickflüssige Glyzerinlösung.

Fast noch überraschender als die Inversion der Gefäßbündel der Pflanzen ist die bei pflanzlichen und tierischen Präparaten hervortretende blitzschnelle Abstoßung des Ferrozyans im anodischen Präparat. Das hängt offenbar damit zusammen, daß in der mikroskopischen Nähe die Abstoßungskraft der statischen Elektrizität, die sich nach dem umgekehrten Quadrat der Entfernung vergrößert, eine unvorstellbar hohe Intensitätsgröße erlangt, zumal die Masse sich nicht im selben Verhältnis verkleinert, sondern dem Ferrozyanmolekül gegenüber als ein Ganzes wirkt. In der Tat ist die Schnelligkeit packend, mit der das Berlinerblau von dem anodischen Präparat abschnellt. Ich habe diese Tatsache oft und oft beobachten können.

Ebenso überraschend im Grunde, wenn auch nicht so sinnfällig, ist das blitzschnelle Enteisenen des Eisenchlorids an der Kathode. Man kann es mit kräftigen, frischen Präparaten dahin bringen, daß z. B. Pollenstaub eine 5 prozentige und noch stärkere Eisenlösung in eineinhalb Minuten, vielleicht sogar noch schneller, ganz eisenfrei macht. Diese Raschheit der Wirkung ist eines der Hauptkennzeichen der unipolaren statischen Entladung, die den Vorgang herbeiführt. Eine chemische Reaktion mit Nachdiffundieren des verbrauchten Eisens oder eine galvanische Strom-Elektrolyse müßte viel mehr Zeit in Anspruch nehmen.

Andere normal Farben sehende Untersucher werden naturgemäß nicht Ferrozyan und Eisen zum Feststellen der anodischen Ladung wählen, weil das Arbeiten mit diesen beiden Reagentien verschiedene Nachteile mit sich bringt. So z. B. wird in alkalischen Lösungen (und fast alle tierischen und pflanzlichen Objekte sind überwiegend alkalisch) Berlinerblau angegriffen, entfärbt oder zerstört, das Eisen im Ueberschuß reagiert mit gewissen Pflanzenstoffen oder wird von den Kathoden sehr oft allein reduziert, ferner muß man ziemlich konzentrierte Lösungen anwenden, wenn man deutliche Bilder erhalten will, weil Berlinerblau sich in Wasser und Glyzerin etwas löst, beim An-

trocknungsverfahren sind die Lösungen naturgemäß übersättigt. Wer künftig Anoden aufsucht, wird das Verfahren Unnas für Sauerstofforte wählen, einen sauren Teerfarbstoff oder ein anderes bequemeres Verfahren.

Ich habe den umständlichen Weg wählen müssen aus verschiedenen zwingenden Gründen, die nur für mich in Betracht kommen. Erstens habe ich zu demonstrieren gehabt, daß viele der üblichen Tinktionen elektrischen, nicht chemischen Ursachen entstammen, ich mußte also an einer großen Reihe von Präparaten die Kathoden und Anoden so ausfärben, daß das Positiv und Negativ deutlich mit demselben Färbemittel hervortrat. Hätte ich das nur an einem oder an wenigen Objekten gezeigt, so hätte man eingewendet, gerade jene Stoffe hätten eine besondere chemische Affinität zu diesem oder jenem Zellbestandteil, wie es jene Forscher getan haben, die durch Zufall darauf kamen, daß man mit der Umkehrung der Reihenfolge gewisser Lösungen umgekehrte Bilder erzeugen kann. Ist aber einmal die Erkenntnis angenommen, daß viele Teerfarbstoffe reine Anodenbilder erzeugen, so kann man sichs bequemer machen.

Dann hinderte mich meine Rot-Grün-Blindheit sehr an der Arbeit mit anderen Farben als Blau. Ich sehe das Pflanzengrün wegen des darin enthaltenen Xantophylls rein gelb, andere gefärbte Zellteile braun.

Für die Zukunft setze ich große Hoffnungen auf die Einführung körpereigener Stoffe, oder solcher, die an Stelle eines Nahrungssalzes verbraucht werden, z. B. Brom oder Jod, wobei sich die natürlichen Anoden hoffentlich schärfer und vollständiger präsentieren werden als bei meinem Verfahren, mit dem ich die Objekte notgedrungen schädigen muß.

Immerhin habe ich aus den bisherigen Feststellungen die sichere Ueberzeugung gewonnen, daß die Pflanzen- und Tierzelle als Ganzes eine ziemlich starke Kathode ist, welche nach außenhin unipolare elektrolytische Vorgänge hervorruft.

Die anodische Berlinerblaufärbung, bei der die Objekte mit einem farblosen Ring umgeben sind, der an einen tief blauen Graben anschließt, ist, auch wenn dabei manchmal die Ausfärbung des Objektes selber mißlingt, doch ein negativer Beweis für die starke Kathodennatur lebender Zellen. Es ist meines Wissens die erste Demonstration einer chemischen Fernwirkung

durch die Zelle. Wenn diese Fernwirkung sich auch nur auf ein oder zwei Hundertstel Millimeter erstreckt, so ist sie doch so sicher und in gesetzmäßiger Größe eintretend, daß ihr eine grundsätzliche Bedeutung innewohnt. Sie ist nicht nur physiologisch neu, sondern sie demonstriert auch elektrochemisch etwas Neues, die unipolare Elektrolyse durch statische Elektrizitätsquellen.

DER JODSTÄRKE-TYPUS MIKROCHEMISCHER REAKTIONEN.

Gelegentlich der Untersuchung der Schließzellen in der Außenhaut der Lilium- und Iris-Arten habe ich beobachtet, daß es mir nicht gelungen ist, in gewissen lebenden unversehrten Zellen Jod (wie überhaupt die Anionen $Cr_2 O_7''$, J', Säurefuchsin, Ferrozyanwasserstoff etc.) hineinzubringen. Es gelang mir nicht einmal zuverlässig die so empfindliche und zuverlässige Jodreaktion auf die reichlich vorhandene Stärke, solange die Zellen lebend und nicht angeschnitten waren. Ich sah in dem kleinen Handbuch von Strasburger*) nach und fand, daß diese bekannte Reaktion im lebenden Gewebe auch keinem andern richtig geglückt ist. Ich will natürlich nicht den entgegengesetzten Fehler der rein chemischen Mikroskopiker begehen und etwa an diesem Beispiel behaupten, die Jodstärke-Reaktion werde rein elektrisch erzeugt. Gerade dieses Beispiel zeigt in klarer Form, daß ohne die chemischen Substrate, und zwar ohne die speziellen chemischen Stoffe, die Blaufärbung unvorstellbar ist.

Aber ebenso zeigt dieses Beispiel, daß auch zu dieser so spezifisch chemisch erscheinenden Reaktion eine gewisse elektrische Konfiguration der Zelle gehört. Die Reaktion gelingt nur entweder im neutralen Reagensglas oder unter anodischer Polarisation, die dem Jodion den Zutritt ermöglicht. In den normal kathodischen Zellen des lebenden Chlorophyllblattes gelingt sie bei unverletzter lebender Zellmembran nicht. In Strasburgers Handbuch wird der Mißerfolg der Jodreaktion am lebenden Chlorophyllkorn wie folgt begründet: „Dahingegen wird ein ganzes, unversehrtes Chlorophyllkorn mit Jodjodkaliumlösung

*) Das kleine botan. Praktikum. Jena, Fischer, 1902.

braun gefärbt, und zwar infolge der kombinierten Blaufärbung der Stärkeeinschlüsse, der gelbbraunen Färbung der protoplasmatischen Grundlage und der grünen des Chlorophylls.“

Diese Erklärung ist irrtümlich. Als Rot-Grünblinder erkenne ich in Mischfarben die feinsten Spuren Blau, habe aber bei den verschiedensten Proben mit Jodjodkalium und mit alkoholischer Jodtinktur kein Blau in lebenden unversehrten Zellen erzeugen können. Bei Strasburger heißt es weiter: „Um günstige Jodfärbungen des unversehrten Korns zu bekommen, nehmen wir Blätter in Untersuchung, die längere Zeit in Alkohol gelegen haben und sich dort entfärbten. Die Chlorophyllkörner erscheinen jetzt farblos; ihre Stärkeeinschlüsse nehmen, bei allmählichem Zutritt der Jodlösung, früher als der protoplasmatische Körper, die Färbung an. Die Jodreaktion wird noch auffallender, wenn das Präparat zuvor mit Kali, welches die Stärkekörner zur Quellung brachte, behandelt worden ist . . . Der Nachweis von Stärkekörnern gelingt ebenso sicher mit frischen Körnern, die man mit Chloralhydrat behandelt hat.“

Was hier geschildert wird, ist das Töten des lebenden Blattes. Erst wenn durch Alkohol oder Kali das Blatt getötet worden ist, gelingt die Blaufärbung mit Jod zuverlässig. Bisweilen, wenn die Jodlösung allein stark genug ist, um die Zelle ziemlich rasch zu vergiften, wirkt auch Jod allein bläuend auf Stärke, aber nicht sofort. Man kann aber auch dann beobachten, daß gewisse Zellkategorien kathodischer Polarisation oder mit kathodischen Membranen das Jod anfangs ablehnen, selbst im aufgeschnittenen Zustande, in dem die Lösung freien Zutritt hat. In der Literatur sind diese Beobachtungen nicht unbemerkt geblieben, sie werden auf die „Launenhaftigkeit der Tinktionen“ zurückgeführt. Meine Beobachtung ist also nicht neu; sie wird in der herrschenden Anschauungsweise so ausgedrückt: die Jodstärke-Reaktion gelingt nur bei Anwesenheit von HJ. Jeder Botaniker, der öfter mit Jod unter dem Mikroskop gearbeitet hat, wird sich daran erinnern, daß in vollkommen geöffneten Längsschnitten oder Querschnitten im ersten Augenblick gewisse Färbungen eintreten, z. B. die Spiralen der Schraubengefäße und die Stärkekörner der sogenannten Stärkescheiden und einzelner Markstrahlen. Wäscht man das Präparat gut von dem Jod aus und läßt es einfach einige Wochen liegen, bis es ganz abgestorben ist,

so färbt sich bei Jodzusatz so ziemlich das ganze Präparat. In fast allen Zellen scheinen Stärke oder andere jodbläuende Kohlehydrate sich zu färben und fast alle Zellwände bräunen sich.

Jod als Jodchlorzink wird von den Botanikern auch dazu benützt, die Verholzung der Zellwände zu analysieren. Eine Zellwand, die sich mit Jod bräunt, gilt als verholzt (Pektinreaktion). Auch die anderen Verholzungsreaktionen mit Schwefelsäure u. s. w. ziehen ebensowenig die elektrische Ladung der Zellwände in Betracht. Wenn in den Pflanzenhistologien zu lesen ist, die Wände des Siebteils (Phloëms) seien an den nicht verholzten Zellwänden zu unterscheiden, so denkt man dabei vorzugsweise an das Farblosbleiben des frischen Präparates in Jod und an ähnlich elektrisch mitbeeinflußte Reaktionen.

Es sei zugestanden, daß zwischen Jod und Pektinstoffen spezifische chemische Affinitäten bestehen, aber die Art der Feststellung der Verholzung erscheint mir dessenungeachtet unzureichend. Solange nicht alle diese Reaktionen auch an ganz abgestorbenen Pflanzenteilen nachgeprüft worden sind, dürfen sie nicht als mikroanalytische Reaktionen auf Verholzung angesehen werden.

Selbst im frischen lebenden zweijährigen Stamme oder in der zweijährigen Wurzel sieht man die Siebteile im Jahresring des letzten Jahres auf Jod reagieren. Darauf werden die Anhänger dieser Methode sagen, das sei eben ein Beweis dafür, daß schon die Siebteile des Vorjahres verholzt sind. Zweifellos aber werden genauere Untersuchungen des Absterbens lebender Siebteile ergeben, daß nicht ein neuer chemischer Stoff, sondern das Aufhören der Elektronegativität des lebenden Gewebes die Reaktion ermöglicht.

Jod in Chlorzinklösung färbt in zwei Farben, teils violett gewisse wahrscheinlich Kohlehydrat enthaltende Zellteile, insbesondere Stärke und Zellulose, zweitens gelb gewisse Eiweißelemente der Pflanzen und braun verholzte Zellwände. Ich habe nach dem ersten Vergleich zwischen meinen Kathoden und Anoden und den Chlorzinkjodfärbungen angenommen, daß die violette Reaktion anodisch ist, die braune kathodisch, aber die Sache scheint nicht so einfach zu liegen. Man sieht gelegentlich, namentlich nach einiger Zeit, Bräunungen auch an anodischen Stellen.

Ueber die Ursache der Jodstärke-Reaktion schließt sich Czapek in seiner „Biochemie der Pflanzen"*) der Meinung von Harrison an, welcher die Blaufärbung einer kolloidalen Jodlösung zuschreibt, in welcher Stärke die Rolle des Schutzkolloids spielt. Alkalien, organische Solventien für Jod, Pyrogallol, Hydrochinon hemmen die Jodstärke-Reaktion. Nach dieser Erklärung ist es zu verstehen, daß Stärke, die sich an einer Kathode befindet, keine Jodreaktion geben kann, denn an der Kathode müssen immer Alkalien zugleich mit reduzierenden Substanzen vom chemischen Effekt von Hydrochinon, Pyrogallol vorhanden sein, von denen eine einzige schon genügt, um die Reaktion zu verhindern.

EINWÄNDE GEGEN DIE MIKRO-ELEKTROLYSE.

Im Verlauf der letzten Monate habe ich Dutzende von verschiedenen Zellarten von Tieren und Pflanzen Metallsalze, nicht nur Eisen, elektrolysieren lassen und womöglich durch Reagentien in umgekehrter Reihenfolge Kontrastbilder erzeugt. Ich habe mich auch bemüht, die Einwände zu widerlegen, die ich mir selber dagegen vorbrachte oder die ich von Fachleuten im mündlichen Verkehr vernahm.

Das Erste, was man mir erwidert, ist etwa folgendes: Die Plausibilität der Kontrastbilder des Berlinerblaus als Elektrolysen zugegeben, so kann man sich trotzdem noch immer vorstellen, daß das Eisen im Eisenchlorid und das Kalium im Kaliumferrozyanid aus chemischen nicht aus elektrischen Gründen von der Zelle angezogen werden; die Tatsache, daß in beiden Lösungen der basische Bestandteil zu den Zellen wandert und der saure Bestandteil des Salzes auf dem Glase eintrocknet, läßt sich auch chemisch erklären. Es besteht kein zwingender Anlaß, deshalb eine so eingewurzelte Vorstellung durch eine ganz neue zu ersetzen.

Darauf ist zu erwidern: Gegen die chemische Natur der Zersetzung der Salzlösungen spricht vor allem die überraschende Schnelligkeit des Vorganges, namentlich auf der kathodischen Seite, bei der ein Antrocknen zum Fixieren des Bildes nicht

*) Jena, 1913, pag. 407.

notwendig ist. In wenigen, zwei, drei Minuten ist eine ziemlich starke Eisenlösung eisenfrei. Ein Diffusionsvorgang, der aus dem chemischen Verbrauch des Eisens in der Zelle resultieren müßte, kann sich unmöglich so blitzschnell vollziehen. Nur eine direkte Anziehung auf das Eisen, wie sie ein Elektrizitätspol oder eine Vielheit von Polen ausübt, kann das Glas des Objektträgers so rasch von jedem Eisengehalt freimachen.

Der zweite Einwand ist der: das Eisen, oder das Ferrozyanradikal hätte eine bestimmte spezifische chemische Affinität zu gewissen Zellbestandteilen. Dann aber versteht man nicht, weshalb in Dutzenden von grundverschiedenen tierischen und pflanzlichen Zellen erst nach Beseitigung des Kurzschlusses durch Antrocknen die chemische Affinität zum Ferrozyan hervortritt und im frischen oberflächlich leitenden Schnitt nicht zu existieren scheint. Ferner ist hier zu erwidern, daß auch die große Zahl der verschiedenen Objekte und ihre gesetzmäßige Stetigkeit gegen eine besondere Affinität gerade für Eisen oder Ferrozyan spricht. Ich kann bei jedem Schnitt, bei dem aus der Literatur eine Lebendfärbung bekannt ist, mit absoluter Sicherheit voraussagen, wie sie sich gegen Eisen, Blei, Kupfer, Zink in Salzform verhält und ebenso wie das Kontrastbild mit dem Säureanion ausfallen wird. Ich habe auch schon bei einzelnen Zellen unter abnormen Umständen (Kälte, Wassermangel, Verdunkelung bei Pflanzen) abnorme kathodische Bilder erhalten, aber in solchen Fällen waren auch immer die anodischen Bilder abnorm. Hiergegen ließe sich wohl sagen, daß auch ein abnormer Chemismus eingetreten sein und die abnormen Bilder verursacht haben könnte. Aber die große Zahl der Uebereinstimmungen untereinander und die lückenlose Uebereinstimmung mit dem makroskopischen elektrischen Befund der Elektrophysiologie, wo ein solcher vorliegt, läßt keinen Zweifel daran übrig, daß der elektrische Faktor ein Hauptfaktor der Bilderzeugung ist.

Ein dritter Haupteinwand ergibt sich aus meinen eigenen Experimenten. Einige Objekte widerstanden allen Versuchen, direkte Kontrastbilder zu erzeugen, Stengelquerschnitte von Primeln besaßen einen Kambiumring, der manchmal kathodisch, manchmal anodisch zu sein schien, die Versuche an Eizellen der Pflanzen ergaben keine deutlichen Kontrastbilder, ebenso die Schnitte von Bohnen-, Erbsen- und Linsenkeimlingen. Letztere,

die in sehr großer Zahl ausgeführt wurden, ergaben ziemlich ähnliche kathodische und anodische Bilder bis auf den Umstand, daß die allgemeine Abstoßungskraft gegen Anionen deutlich blieb. Diese Mißerfolge lagen an experimentellen Schwierigkeiten. So haben manche Objekte z. B. Keimlinge so viele luftgefüllte Interzellularen, daß sie durch ihr Hervortreten als schwarze Stellen das ganze Bild beherrschen und kein Kontrastbild aufkommen lassen. In den Interzellularen setzt sich auch das erste Reagens mechanisch oder durch Adsorption fest, kann auf keine Seite hin abgestoßen werden und erzeugt mit dem zweiten Reagens Niederschläge unelektrischen Ursprungs. Ueberhaupt konnte man direkte Kontrastbilder nur erwarten, wenn alle Bilder der Histologen n u r elektrischen Ursprungs gewesen wären. Das ist aber sicher nicht der Fall. Wer das behaupten wollte, wäre ebenso einseitig wie jene, die alles auf chemische Affinitäten zurückführen. Das elektrische Moment ist nur e i n e Ursache der Tinktion, nach meinen Beobachtungen bei lebenden Zellen die weitaus stärkste und häufigste, aber nicht die einzige Ursache der Färbungen.

Ein vierter Einwand ergibt sich daraus, daß die Kontrastbilder, strenge genommen, der elektrolytischen Färbung zu widersprechen scheinen. Man könnte etwa folgendermaßen dagegen argumentieren: Wenn wirklich das Pollenkorn eine einfache Kathode wäre, so zieht es aus dem Eisenchlorid das Eisen an sich, verbraucht es aber, indem es das Eisen teils mit dem Wasser unter Wasserstoffabscheidung zu Eisenhydroxyd oder dergleichen Verbindungen umsetzt, teils mit Pflanzensäuren oder mit amphoteren Eiweißen verbindet. Nach dieser Ueberlegung ist es unverständlich, weshalb noch genug lösliches Eisen an der Anode bleibt, um das Berlinerblau zu erzeugen, zumal das Ferrozyananion auch weiterhin von der Pollenkathode abgestoßen und in einer gewissen Entfernung gehalten werden sollte. Mit diesem Einwand in Uebereinstimmung ist der tatsächliche experimentelle Befund, daß Eisenoxydul-Verbindungen oft kathodisch ausfallen, noch bevor das Ferrozyan auf das Präparat gelangt. Aber man hat sich die unipolare Elektrolyse nicht nach dem Laboratoriumsschema vorzustellen, sondern etwa in der Art, daß wohl an der Pollenoberfläche Kathoden vorhanden sein mögen, die sich mit dem Eisenchlorid allein entladen und dann verbraucht

sind, sondern daß die Hauptwirkung von dem generativen Kern des Pollenkorns ausgeht, das hinter einer Isolierung durch die beiden Membranen, (die sogenannte Exine und die Intine) die Ferrozyananionen abstößt und die Eisenkationen an sich zieht, aber nicht entlädt, sondern nur influenzelektrisch eine statische Ansammlung von Eisenkationen erzeugt, die dann später vorzugsweise in der Nähe des Kerns angetroffen werden.

Allerdings ist die Auflagerung auf jene Stellen der Membran, hinter der der Kern liegt, in dem Beispiel des Pollens keineswegs eine reguläre Erscheinung, sondern in vielen Fällen, sogar in den meisten Fällen ist die ganze Zelloberfläche kathodisch gleichmäßig gefärbt, anodisch gleichmäßig farblos. In solchen Fällen ist in dem vorgenannten Beispiel die negative Ladung des Kerns durch die negative Ladung des gesamten inneren Protoplasmas und der Kerne zu ersetzen. Als Regel wäre nur an dem Bild festzuhalten, daß die Zellmembranen statische Isolatoren sind, hinter denen Ladungen sitzen, die auf der Außenseite der Zelle die entgegengesetzt geladenen Atomkomplexe anziehen und in einem Umkreis festhalten, der in dem farblosen Hof des Anodenbildes zu Tage tritt.

Diese Argumentierung wird vielen nicht so zwingend erscheinen, um bewährte Vorstellungsbilder rein chemischen Geschehens verlassen zu müssen. Aber die experimentelle Wirklichkeit ist eben immer ein wenig komplizierter als der theoretische Gedanke, und die Idee der rein chemischen Laboratoriums-Ausfällung in der lebenden sicher elektrischen Zelle war von vornherein naiv, unwissenschaftlich und oberflächlich, so daß es zwingender Experimente bedürfte, sie zu halten, nicht, sie zu widerlegen. Die Elektrizität, die so oft in den Zellverbänden beobachtet und gemessen wurde, ist von allem Anfang an dagewesen, ihre elektrochemische Wirkung einfach zu vernachlässigen, ist ein direkter Fehler, der nicht erst durch neue Tatsachen widerlegt werden müßte.

Wer sich übrigens mit der Elektrolyse von Metallsalzen durch lebende Objekte nur einigermaßen beschäftigt, wird sich der Tatsache nicht verschließen können, daß eine Methode, die in neunzig von hundert Fällen die Art der Färbung vorauszusagen erlaubt, einen gesunden Kern enthält, wenn auch die neuen Versuche in einzelnen Nebenpunkten nicht eindeutig ausfallen.

Schließlich sei noch besprochen, in welcher Weise die herrschende einseitig chemische Tinktionslehre die scharfe Färbung nach Antrocknung im Falle Molisch bei der Zuckerrübe erklärt, die sich feucht diffus mit Diphenylamin bläut, nach Antrocknen aber die äußerste Zellreihe scharf blau heraushebt. Man sagt jetzt: durch das Eintrocknen wird die Konzentration des Salpeters in der äußersten Zellreihe so verstärkt, daß die Diphenylamin-Reaktion gelingt. In dieser Erklärung liegt ein offensichtlicher Irrtum. Der Konzentrations unterschied, auf den es bei der Herausdifferenzierung allein ankommen kann, ist im Moment des Schneidens am größten, wenn wirklich nur diese Zellreihe Salpeter enthält, nach dem Schneiden muß dieser Salpeter rasch in die anderen Zellenquerschnitte diffundieren und der Konzentrationsunterschied von Minute zu Minute durch Diffusion schwächer werden. Welche Kraft ist es nun, die in dem toten Zellsaft der Schnittfläche die Mischung und Diffusion nicht nur verhindert, sondern sogar noch einen schärferen Bildunterschied während des Antrocknens erzeugt? Nach Lage der Dinge kann dies keine andere sein als die Elektrizität.

Ueberdies stimmt die anodische Ladung der obersten Zellreihe mit der Tatsache der saueren Wurzel-„Ausscheidungen" gut überein.

ANDERE PFLANZLICHE OBJEKTE.

Nach den Wurzeln des Ficus wurden verschiedene andere Wurzeln, Stengel, Blätter, auch Blüten auf ihre elektrische Polarität mit den kombinierten Metallsalzen und Teerfarbstoffen geprüft. Als kathodische Reagentien dienten Methylenblau, Goldchlorid, Silbernitrat, Berlinerblau (mit der Variante Eisenchlorid an erster Stelle), Chromgelb (Variante Bleizucker an erster Stelle), gelbes Bleijodid (ebenfalls Bleisalz zuerst), als anodische Reagentien Jod in Jodkalium, Säurefuchsin, Eosin, und die Schwermetallfarben in der Variante des Anions zuerst.

Von den Kationen färbte mein Methylenblau unzuverlässig die Zellkathoden. Sei es, daß die vielen reduzierenden Stoffe der lebenden Zellen oder ihre starke Elektronegativität das Methylenblau zu farblosem Leukomethylenblau reduzieren — solche Vorgänge konnte Ehrlich im lebenden Tier mit

freiem Auge konstatieren — sei es, daß mein Blau verunreinigt war und ohnehin Leukobasen enthielt; man erhält mit Methylenblau wohl hie und da sehr scharfe Kathoden, z. B. in der obersten Zellreihe der Irisblätter, im Kambium, im Siebteil der Gefäßbündel, aber zuweilen färben sich auch ausgesprochene Anoden und bei stärkerer Konzentration findet man nur eine tiefblaue diffuse Allgemeinfärbung. Auch in Unnas Tafeln sieht man ausgesprochene Anoden, z. B. die Mastzellen, mit bloßem Methylenblau tingiert.

Bisweilen erhält man an ein und demselben Schnitt, wahrscheinlich infolge des ungleichzeitigen Absterbens der einzelnen Teile Kontrastbilder, beispielsweise bei einem Querschnitt eines Araucaria-Zweiges einen Teil im älteren Jahresring blau und im Splint weniger gefärbt, den Rest umgekehrt gefärbt.

Ferner erweisen sich die Bleisalze als unzweckmäßig. Sie scheinen zu rasch zu vergiften und tote Pflanzen färben sich ganz unberechenbar, zumeist diffus mit allen nicht sehr verdünnten Lösungen.

Schließlich habe ich die meisten Objekte auch noch mit Permanganat behandelt, das kein ganz zuverlässiges kathodisches Reagens ist, wohl ein farbiges Anion enthält, aber zumeist die Kathoden kenntlich macht, weil es dort zu tiefbraunem Manganoxyden reduziert wird.

Schöne Inversionsbilder lieferte mir nach wochenlangen vergeblichen Bemühungen schließlich das Blatt von Iris florentina im Querschnitt, besonders das Gefäßbündel. Wenn man die Oberhaut des Blattes abzieht, gehen immer die an der Epidermis festhaftenden oberflächlichen Leitbündel mit und wenn man diese invers in dieser Form zu färben versucht, so schimmern diese geschlossenen Gefäßbündel bei beiden Färbungsarten, anodisch und kathodisch, — bei meinen Färbungen gewöhnlich blau — durch. Obwohl ich mich vollkommen sicher fühlte, daß das ganz unmöglich sein konnte, und obwohl ich mit verschiedenen basischen und sauren Teerfarben probierte, immer kam das nahezu identische Bild zustande. Aber Querschnitte und Längsschnitte brachten die Erklärung. Besonders der Querschnitt ist elektrohistologisch sehr interessant.

Das Leitbündel enthält vor allem, von der Epidermis angefangen, die einzellige, mehrfach als kathodisch erwähnte Ober-

haut. Da deren Zellen im Naturzustand glashell und inhaltsleer sind, so ist die tiefe Bläung, die man öfter erhält, bei kathodischem Berlinerblau, die sich von den dichten Chlorophyllzellen darunter scharf abhebt, um so auffälliger.

Spätere Versuche mit basischen und sauren Farben, mit Eisen- und Bleisalzen haben gezeigt, daß die Negativität der Pflanzenoberhaut, (Cuticula der Epidermis) keine einfache Erscheinung ist. Sie verschwindet nahezu ganz bei Pflanzen, die eine Nacht lang im Dunkeln standen, sie wechselt auch bei abgeschnittenen und eine Stunde welken gelassenen Blättern ihren Charakter. Es ist auch nicht ausgeschlossen, daß die äußerste Lamelle der Cuticula anodisch ist und daß die Kette von blauen Perlen, als die sich die Epidermisreihe im kathodischen Präparat oft auffallend präsentiert, davon herrührt, daß eine normal anodische Lamelle der Cuticula das kathodisch wandernde Eisenion von sich abstößt und daß aus den protoplasmaarmen, steifwandigen, mit Zellsaft gefüllten Zellen beim Eintrocknen kleine Näpfchen werden, in denen die abgestoßenen Eisenkationen sich ansammeln und vom Ferrozyan später niedergeschlagen werden. Wenn man das Kathodenbild durch Auswaschen ohne Antrocknen herstellt, so hebt sich die Epidermis nicht mehr so stark blau ab wie nach dem Antrocknen. Spätere Versuche mit Maiglöckchenblättern, Hyazinthen, Koniferen-Nadeln ergaben die äußerste Oberhaut-Lamelle (Cuticula) in Uebereinstimmung mit der Jodchlorzinkfärbung relativ anodisch, das heißt, unbezweifelbar sehr viel weniger kathodisch als die eigentliche Epidermismembran.

Wie das Bild zeigt, liegt unter der kathodischen Oberhaut im Gefäßbündel zunächst eine anodische Sklerenchymscheide. Diese Zellgattung wird von der Pflanzenphysiologie als bloßes Stützgewebe gedeutet, ähnlich etwa den Knochen und Knorpeln der Tiere. Da ist es nun sehr auffällig, daß diese Gewebeart (ebenso wie der Knorpel der Tiere bei Unna) sich als eine relative Anode präsentiert, ein bei der Seltenheit anodischer Zellen im Tier- und Pflanzenreich äußerst bemerkenswerter Umstand. Es sieht also so aus, als ob das Stützgewebe zugleich elektrische Funktionen (wahrscheinlich als Dielektrikum) zu erfüllen hätte.

In der vorliegenden Pflanze hat die Sklerenchymscheide im Querschnitt die Form einer Kapuze, die dem Siebteil aufgesetzt ist, der sich immer scharf konträr, also im frischen, gut beleuchteten und bewässerten Blatt kathodisch erweist. Der Siebteil, Phloëm, von älteren Autoren auch Leptom genannt, war sicher kathodisch zu erwarten; die Beschreibung der chemischen Stoffe, die man in ihm vorzugsweise findet, — Kalium, andere Metallkationen, reduzierende Stoffe — deutete schon darauf hin, daß ohne eine starke kathodische Polarisation diese Stoffe sich nicht im Phloëm ansammeln konnten, der stärkste Hinweis aber lag darin, daß nach dem übereinstimmenden Zeugnis aller Elektrophysiologen die lebenden Querschnitte aller Zellen sich negativ verhalten gegenüber den toten Zellen (Hornhaut, Knochen, Holz, Bastfasern). Es stimmte also sehr gut zu diesem allgemeinen Gesetz, daß der Siebteil sich oft anfangs bei Gold- oder Silbersalzfärbung vom übrigen Gewebe tiefschwarz abhebt, bevor alles andere Gewebe sich schwärzt. Diese Kathodennatur bezieht sich auf die Zellgattung als Ganzes. Die Siebplatten selbst färben sich vorzugsweise mit Jodchlorzink und anodischen Farben. Sie scheinen schwach anodisch zu sein, ebenso der Kallusbelag dieser Platten.

Die nächste Zellgattung im Irisblatt ist das Kambium, die Keimschicht der Gefäßbündel, das sich ebenso färbt wie das Phloëm, vollkommen lebend ist, noch stärker als dieses, gewöhnlich im Wachstum und in Zellteilung begriffen ist und nach beiden Seiten die Gefäßzellen geliefert hat, im vorliegenden Beispiel nach oben die Siebröhren und ihre Geleitzellen, nach unten das Xylem, den Holzgefäßteil, der die Spiralröhren, die Ringgefäße und die übrigen die Wasserbewegung von der Wurzel leitenden Bahnen enthält. Das Xylem zeigt keine so in die Augen fallende Kontrastfärbung wie andere Zellen, weil seine verdickten, spiraligen Wände schon im ungefärbten Bild ziemlich dunkel das Gesichtsfeld ihres Gebietes beherrschen und bei dem allgemeinen blauen Ton leicht eine Dunkelfärbung vortäuschen, wo eine solche gar nicht vorliegt.

Meine dicken Schnitte, die ich ohne Mikrotom und ohne Härten und Fixieren aus frischen Präparaten anfertigen mußte, erlaubten keine feinen Feststellungen, auch im Querschnitt. Die Vermutung, die mich sehr interessierte, ob nämlich das assimi-

lierende Chlorophyllkorn anodisch und das ihn umgebende Protoplasma stark kathodisch sei, die sich auf Mac Callums Kaliumbilder stützt und auf damit übereinstimmende physiologische Tatsachen, ließ sich auf meinen Schnitten, auf denen Chlorophyllkörner nur in der Durchsicht überlagert und unterlagert von dicken Protoplasmaschichten erschienen, nicht ermitteln. Dieser Teil des Objektes pflegte sich, was ja meiner Vermutung nicht widerspricht, bei schwacher Vergrößerung anodisch und kathodisch zu färben.

Der Gefäßteil färbt sich keineswegs gleichmäßig anodisch, sondern es zeigt sich namentlich am Längsschnitt, in dem lange unverletzte Spiralen hie und da aus dem Präparat hervorragen, aber mit Jod in Jodkalium, mit Berlinerblau (anodische Variante), am deutlichsten im Zentralzylinder der Wurzeln, daß die Spiralen des Xylems zumeist ein Sitz der Anodizität sind. Merkwürdigerweise erhielt ich mit Jodblei, — wahrscheinlich infolge der an anderer Stelle ausführlicher erläuterten Umkehrung der Tinktion durch Vergiftung (Fixation der Histologen), — deutlich gelbe Spiralen auch nach der kathodischen Methode. Gewöhnlich aber heben sich an guten dünnen Querschnitten, an denen Spiralgefäße nicht mit anderen Gefäßarten, namentlich nicht mit Siebgefäßen unterlagert oder überlagert sind, die Spiralgefäße trotz ihrer natürlichen dunklen Linien im normal lebenden Objekt kathodisch ungefärbt auf dem gefärbten Hintergrund der lebenden Zellenterritorien ab. Von Oktober ab erhielt ich von Iris keine normalen Bilder mehr, sondern die Gefäße und Chlorophyllzellen waren auf demselben Blatt teils negativ teils positiv.

Ziemlich genau wie Jod und anodische Metallsalzkombinationen verhält sich das Säurefuchsin. Dieser saure Farbstoff wird wohl von Normalsehenden als rot bezeichnet, ist jedoch eine Mischfarbe, die in der Durchsicht so reichlich blaue Strahlen enthält, daß ich mit ihr einigermaßen zurechtkomme. Leider entfärbt sich der Farbstoff in alkalischen Flüssigkeiten und verliert vor allem seine blauen Strahlen, an denen ich ihn erkenne. Fast alle meine überwiegend kathodischen Präparate aber waren alkalisch. In dem Querschnitt von Iris jedoch, in dem die Anoden, wie es naturgemäß oft der Fall ist, sauer zu reagieren scheinen, oder jedenfalls weniger alkalisch als die Kathodenzellen, erhält man schöne Kontrastbilder zu den kathodischen Färbungen, die

wieder unter sich mit den alten einfachen Färbungsbildern, selbst mit Jod, das als spezifisches Reagens auf Stärke und Pektinsubstanzen gilt, übereinstimmen.

Bei diesem Objekt haben sich alle Tinktionen ganz nach Wunsch so vollzogen, als ob die histologischen Färbungen gar keine anderen Ursachen hätten als elektrische, wenigstens bis zu einer Vergrößerung von etwa 800, mit der ich diese Schnitte durchmustern konnte. Nur die Behandlung mit Kaliumpermanganat zeigte, daß auch andere kompliziertere Reaktionen vor sich gehen, als bloße Elektrolyse des Farbsalzes in Anion und Kation.

Ferner hat, wie schon hervorgehoben, bei der Kombination Eisen-Ferrozyan die Eisenlösung allein die Tendenz, mit Gerbsäuren oder ähnlichen Stoffen im Sklerenchymbast Niederschläge zu erzeugen. Trotz dieser Behinderung des Versuchsplanes kommt die Sklerenchymkapuze nach Hinzufügung von Blutlaugensalz hell heraus gegen die blauen Kathoden, an denen das Eisen sich angesammelt hatte.

Der Stengel des Ficus, der vorher keine zuverlässigen Kontrastbilder mit den beiden Berlinerblau-Methoden geliefert hatte, ergab nach dem Antrocknungsverfahren Inversionen. Mit großer Bestimmtheit präsentierte sich namentlich im zweijährigen Stämmchen der Jahresring des lebenden Gewebes mit einer scharfen Grenze gegen die abgestorbenen Holzzellen des Vorjahres. Auch hier bestätigte das elektrochemische Mikroskopier-Verfahren den durch die alten Experimente der Elektrophysiologen makroskopisch erhärteten Grundsatz, daß der Querschnitt lebenden Gewebes sich negativ verhält gegenüber dem Querschnitt nicht protoplasmatischen Gewebes und gegenüber der unverletzten Oberfläche.

Im Stengel von Ficus färbt Goldchlorid wohl kathodisch, aber nicht genau so wie kathodisches Berlinerblau. Zu Beginn der Einwirkung heben sich einzelne Zellen des lebenden Jahresringes scharf schwarz hervor, während andere ganz hell bleiben. Später bräunt sich das ganze lebende Gewebe, aber auch das Kernholz.

Wurzeln von Iris ergaben dieselben Polaritäten wie andere Wurzeln. Der lebende Siebteil war kathodisch, tief blau mit kathodischem Berlinerblau, der Gefäßteil zeigte anodische

Schraubentracheïden, hatte scheinbar aber auch im kathodischen Präparat blaue Zellwände, sei es, daß die dunklen Verdickungen blau erschienen, sei es, daß in den noch jungen Wurzeln protoplasmatische lebende Zellreste an den Wänden vorhanden waren. Die Pflanze hat eine deutliche Endodermis um den Zentralgefäßzylinder der Wurzel. Diese Endodermis der Wurzelgefäße samt dem nächst inneren Zellkreis (Perizykel) war kathodisch hell, anodisch etwas bläulich. Die Durchlaßzellen der Endodermis ließen keinen sicheren Unterschied gegen die anderen Zellen der Endodermis feststellen.

Jod in Jodkalium färbt bei diesem Objekt, solange es frisch ist, fast genau wie anodisches Berlinerblau.

Pelargonien habe ich in voller Beleuchtung und 40 Stunden verdunkelt untersucht. Ich prüfte Blattschnitte, Wurzeln und Stengelschnitte auf beide Elektrizitätsladungen, konnte aber keine Regel des Unterschiedes der Ladungen feststellen.

Der Stengelquerschnitt der verdunkelten Pelargonie schwärzte sich schon auf bloße Zugabe von Eisenchlorid so stark, daß die kathodische Berlinerblau-Reaktion von dem bloßen Eisenbild nur eine Verstärkung und Blaufärbung erzeugt.

Eine im Dunkel gehaltene Irispflanze zeigte keine besonderen elektrischen Merkmale, außer vielleicht eine gewisse Launenhaftigkeit der Tinktionen.

Maiglöckchen habe ich deshalb untersucht, weil sein Rhizom histologisch genau beschrieben ist. Meine Pflanzen befanden sich jedoch in einer Vegetationsperiode, die einen anderen Querschnitt aufwies als den bei Strasburger und im „Handwörterbuch der Naturwissenschaften". Ich fand Kontrastbilder zwischen anodisch und kathodisch, konnte jedoch nicht mit voller Sicherheit die einzelnen Zellelemente sicherstellen. Silbernitrat stimmt genau mit kathodischem Berlinerblau, Jod bei gewissen Zellen mit dem anodischen Berlinerblau. Daß der Tracheïdenteil im frischen Objekt das schwarzbraunste im Querschnitt bei Jodbehandlung war, zeigt aufs neue, daß die zweifellos massenhaft vorhandene, offen daliegende Stärke sich kathodisch nicht blau färben kann.

Da Schulemann (wie oben erwähnt) Kohlenaufschwemmungen, chinesische Tusche usw. in die anodischen Reagentien

einreiht, so habe ich mit einer Suspension von fein verteilter Tierkohle Versuche gemacht. Ich gab diese Tusche auf Wurzeln, auf Querschnitte von Irisblättern und sonstige mir vertraute Objekte, habe aber nicht finden können, daß meine Kohlensuspension elektrisch reagierte. Ich versuchte dann Tierkohle, die mit verdünnter Essigsäure aufgeladen war, hatte aber damit denselben Mißerfolg.

POLLENKÖRNER.

Mit großem Interesse unterwarf ich Pollenstaub von blühenden Pflanzen dem kombinierten Berlinerblauverfahren. Ich verfuhr dabei mit besonderer Vorsicht, um das Bild des sehr kleinen Objektes nicht durch eine versehentliche Verschiebung des Deckgläschens zu verrücken. Diese Versuche gelangen vollkommen und lieferten schöne Bilder.

Ich hatte schon im Jahre 1902 viele Versuche mit dem Quadranten-Elektrometer und mit künstlich zugeführter statischer Elektrizität unternommen, wobei sich ergeben hatte, daß frischer Pollenstaub von Narzissen und Hyazinthen gegen die Erde als Nullpunkt 2 Volt und höhere negative Ladung zeigten, u. zw. ziemlich regelmäßig. Ferner ergab sich bei künstlichen Aufladungen zwischen konträr statisch geladenen Stanniolblättern unter dem Mikroskop, daß sich die Pollenkörner zu Ketten aneinander schlossen, die an bestimmten Punkten zusammenklebten, daß also gewisse Punkte der Zelloberfläche eine anodische statische Ladung verrieten.

Pollenstaub ist eines der wenigen Objekte der belebten Natur, bei welchen man mit den groben makroskopischen Meßapparaten eine bestimmte Zellgattung fast rein beobachten und messen kann. Auch ist aus allen älteren Färbeversuchen der rein histologischen Methoden zu erkennen, daß der Pollen seine Ladung auch im flüssigen Substrat ziemlich zähe festhält und daß die äußerste Membran (Exine) sich mit kathodischen Farbstoffen tingiert.

Gleich der erste Versuch mit Pollen von Pelargonien ergab ein volles und reines Kontrastbild zwischen kathodisch und anodisch erzeugtem Berlinerblau. Der Pollen wurde in zwei Häufchen auf den Objektträger gegeben, das linke mit Eisenchloridlösung, (nicht zu viel!) das rechte mit Ferrozyankaliumlösung benetzt,

und zwar mit nahezu gesättigten Lösungen, die auf dem Objektträger eintrocknen gelassen wurden. Dann wurde das linke Häufchen mit einem Deckgläschen vorsichtig und ohne Verschiebung bedeckt, das vorher mit der Blutlaugensalzlösung in Wasser oder Glyzerin angefeuchtet war, das rechte mit einem Deckgläschen, das mit der Eisenlösung überzogen war. Bei zu Dauerpräparaten bestimmten Pollen wurde als zweites Reagens eine möglichst dünn aufgestrichene Glyzerinlösung auf das Deckgläschen geschichtet.

Es ergab sich folgendes: das linke (kathodisch gefärbte) Häufchen wurde schon mit freiem Auge tief blau, das Glas farblos, das rechte (anodisch behandelte) Häufchen blieb farblos und die Bläuung war an den Rand gewandert. Unter dem Mikroskop ergab sich bei schwacher Vergrößerung, daß die Pollenkörner links (kathodisch) gebläut waren, das Glas des Objektträgers nahezu frei von Bläuung, rechts (anodisch) war das Pollenkorn farblos und eine Randschicht um das Pollenkorn oder um mehrere zusammen gebläut. Man sah ganz deutlich: jedes einzelne Korn und, wo mehrere beisammen lagen, jede Gruppe, hatte nach der ersten Benetzung die Lösung unipolar elektrolysiert, links das Eisen an sich gezogen und das Chlorion abgestoßen, rechts das Kaliumion an sich gezogen und das Ferrozyanion von sich abgestoßen. In diesem Zustand waren beide Objekte angetrocknet. Als dann die andere Lösung vorsichtig auf die Körner geschichtet wurde, fand sie links das Glas eisenfrei, das Pollenkorn eisenhaltig, rechts das Korn ferrozyanfrei, das Glas ferrozyanhaltig.

Die Abstoßung des Ferrozyans durch die lebende Zelle, die mir bei den größeren Objekten schon ziemlich auffallend entgegengetreten war, gelangt bei keinem Präparat so rein zum Vorschein wie bei diesen kleinen und stark geladenen Zellen. Sie ist das erste Beispiel einer elektrischen Fernwirkung der lebenden Zelle, einer Wirkung, die niemand auf bloße chemische spezifische Stoffreaktionen zurückführen kann. Wenn ich hundert Objekte vorlege, in denen die negative elektrische Polarität der Zellen an Tinktionen und an dem Freibleiben von Tinktionswirkung deutlich hervortritt, so wird man vielleicht immer wieder entgegnen, es könnten chemische Affinitäten wirksam sein. Irgendeine Säure im Pollen ziehe das basische Eisen an und lasse den Säurerest übrig, oder irgendein Stoff im Pollen habe eine be-

sondere spezifische Affinität für das Kalium des Ferrozyankaliums. Aber erstens hat man den Pollen längst gesammelt und analysieren können, wobei keine saure Natur zum Vorschein gekommen ist, sondern eher das Gegenteil, ein Reichtum an Kali und Magnesia, Zucker und reduzierenden Stoffen, zweitens wird niemand behaupten wollen, daß das Glas, und zwar gerade in einer bestimmten, ziemlich regelmäßigen Entfernung vom Pollenkorn eine spezifische Affinität zu Ferrozyanwasserstoff besitzt. Dieses Ferrozyanwasserstoffion ist vielmehr ganz unbezweifelbar von dem statisch negativen Pollenkorn abgeschleudert worden.

Es zeigen sich nicht nur bei diesem Objekt, sondern auch bei anderen anodischen Präparaten in Glyzerin gelegentlich eigentümliche blaue Ausstrahlungen, die sich entfernt vom Präparat verdicken. Diese Ausstrahlungen, die, wie ich glaube, die Wege der Anionen während des Eintrocknens reproduzieren, sind den Lichtenbergischen Figuren vergleichbar.

Im Kathodenpräparat habe ich solche Figuren am Glas außerhalb des Präparates nicht gesehen. Im Wasser ohne Glyzerin habe ich sie ebenfalls nicht bemerkt.

Nach der wahrscheinlich zutreffenden Beobachtung, daß die negative Ladung des Pollenkorns in der Größenordnung von 2 Volt zu suchen ist, entspricht bei einem Objekt dieser Höhe und Konfiguration dieser Spannung eine Abschleuderung des Anions Ferrozyan von rund 0,05 Millimeter.

Bei demselben Objekt bleibt die Abstoßungsentfernung, wenn das Deckgläschen nicht beim Auflegen Verschiebungen hervorbrachte, ziemlich konstant und ist ganz sicher in einer Beziehung zu der elektromotorischen Kraft des Präparates, wenn diese Beziehung auch keineswegs eine lineare, oder überhaupt eine einfache, ist. Bis man auf anderen Wegen die Ladungen solcher Objekte wird einigermaßen messen können, wird es vielleicht möglich sein, in gewissen Fällen durch eine Art von Interpolation zwischen bekannten Ladungsgrößen mit Hilfe der Abschleuderungsentfernung die Ladungen zu schätzen.

Ich habe nach einer Unterbrechung von einigen Wochen noch zahlreiche Versuche mit Pollen unternommen, u. zw. von Lilien, Primeln, Maiglöckchen, Pelargonien, Begonien, Chrysanthemen u. a. Ich erhielt sehr regelmäßig mit Eisen und Ferro-

zyan, mit Bleiazetat und Jodkalium, mit Zinkchlorid und Ferrozyankalium die Kontrastbilder. Mit Blei und Kaliumbichromat mißlangen sie. Offenbar ist Chromsäure doch zu giftig. Mit Jodblei gelangen sie nicht leicht, weil Bleizucker allein auch ziemlich giftig ist. Immerhin zeigt auch das Blei-Kathodenbild eine bleifreie Glasfläche. Ähnlich reagiert das giftige Zink.

Unter der großen Zahl von Bildern, die ich anfertigte, sind mir auch einige total mißlungen. Man erhält selbstverständlich einen kathodischen Hof, wenn auf wenig Pollen viel Eisenchlorid gegeben wird. Aber in einzelnen Fällen erhielt ich Pollen von scheinbar anodischer Natur aus anscheinend normalen Primeln aus einem Warmhaus. Auch der aus unreifen Antheren ausgekratzte Pollen schien sich unregelmäßig zu bläuen. Ich konnte mir diese sonderbare Erscheinung nicht anders erklären, als daß gewisse Pollen auf ihrer eigenen Anthere nicht zeugungsreif werden, sondern erst in der Luft oder auf den Insekten eine Reifeperiode durchmachen müssen, ehe sie ihre normale Polarität erlangen. Ferner scheint eine der Pollenmembranen anodisch zu sein, u. zw. die Intine. Mit Pollen von Primeln erhielt ich sehr irreguläre Bilder — vielleicht auch wegen der Verschleimung der Körner durch Öltröpfchen.

Ferner habe ich trotz unzähliger Versuche keine Sicherheit darüber erlangen können, ob bestimmte Punkte der Pollenoberfläche, sei es auf der Keimpore, sei es über den oft als Schatten durchschimmernden Kernen eine spezifische negative oder positive Polarität erkennen lassen.

In den „Elektrostat. Zellkräften“ (1912) ist erwähnt, daß vielleicht einst das Verhalten der Kristallachsen um lebende statische Elektroden zur Elektromikroanalyse herangezogen werden wird. Die Kristalle drehen sich im statischen Felde nach gewissen Gesetzen. Zufällig sah ich nun, zuerst bei Pollen in Kaliumbichromat, daß beim Antrocknen unter dem Mikroskop sich die Nadel-Kristalle, senkrecht auf die Pollenoberfläche eingestellt, bilden. Die gleiche Beobachtung machte ich bei Lilienpollen in Jodkalium, dessen senkrechte Nadeln sich beim weiteren Antrocknen beim Ueberschuß von Jodkalium zu regulären Tafeln auswachsen, die sich in einer gewissen Entfernung vom Pollenkorn konzentrisch um dieses ordnen, mit der breiten Fläche gegen den Pollen. Bei viel Jodkalium und wenig Pollenkörnern erhält

man sehr charakteristische Kristallkreise um den Hof des Pollenkorns. (Siehe die Tafeln.)

Auch mit Jodblei erscheint häufig im anodischen Präparat ein Kranz von senkrecht auf der Pollenoberfläche stehenden Kristallen.

Mit salizylsaurem Natrium, das ich um Pollenkörner eintrocknen ließ, erhielt ich hübsche Bilder mit charakteristischer Kristallanordnung bei Lilien. Die großen Pollenkörner von Lilien habe ich auch dazu benützt, sie zwischen zwei Objektträgern zu zerreiben und zu zertrümmern. Ich hoffte, nach Zerstörung der kathodischen Schutzladung der äußeren Zellhaut (der Exine), die innere Haut (Intine) anodisch zu finden, da bei Koernicke angegeben ist, die Intine färbe sich mit Chlorzinkjod violett, auch blaue Stärke mit Jodjodkalium sei festgestellt worden. Ich habe die Versuche mit Chlorzinkjod mit Jodjodkalium an ganzen und zertrümmerten Lilienpollen wiederholt. Meine Geschicklichkeit hat jedoch nicht ausgereicht, um in den zerquetschten Massen mit Sicherheit die beiden Pollenhäute und die Kerne zu unterscheiden. Ich glaube nur festgestellt zu haben, daß die Intine sich tatsächlich mit Berlinerblau anodisch bläut. Die beiden Kerne scheinen in Uebereinstimmung mit beschriebenen älteren Färbungen der Literatur basophil, das heißt, kathodisch zu sein, zumindest aber einer von ihnen.

Mit zerquetschtem Chrysanthemen-Pollen erhielt ich einmal, aber leider nur einmal, ein Kontrastbild, wobei an der Kathode eine Innenzone sich blau abhebt von dem farblosen Rand, von dem sich nicht mit voller Sicherheit sagen läßt, ob der relativ anodische Rand die Intine oder die Exine darstellt oder beide zusammen, ebenso nicht bei dem Anodenbild, das einen deutlichen Kontrast mit dem Kathodenbild zeigt. Die Zellkerne sind in diesem Präparat ziemlich deutlich kathodisch bei den zerquetschten Pollenkörnern, in denen das Reagens zutreten konnte.

DIE ELEKTROPOLARITÄT DES EIKERNES.

Wenn man hört, daß der normale, reife Pollenstaub elektronegativ ist, und zwar eines der elektronegativsten Objekte, das man in der Pflanzenwelt auffinden kann, so liegt naturgemäß der Gedanke nahe, daß die Narbe der weiblichen Blüte, von der er

angezogen wird, im weiteren Verlauf seines natürlichen Weges auch der Eikern, mit dem sich ein generativer Kern des Pollens später vereinigt, elektropositiv reagiert. Um so mehr drängt sich diese Vermutung dem Elektrohistologen auf, der von der Idee ausgeht, daß Säureorte Anoden sind. Denn die Narbe vieler Blumen hat eine saure Oberfläche. Ich habe auch versucht, Narbe, Griffel und Fruchtknoten, die ganze weibliche Blütenanlage elektrisch zu analysieren, habe aber an der Narbenoberfläche vor allem eine auffallend kathodische Papillenschicht gefunden und keine sichere Anode.

Gleich die ersten Schnitte zeigten, daß der weibliche Geschlechtsapparat der untersuchten Phanerogamen anodischer ist als andere untersuchte Pflanzenteile, daß im Nucellus, in dem sich der Embryosack mit dem Eikern befindet, Anoden auffallen, die dort große Teile dieses Organs einnehmen und eikernähnliche Bilder geben. Ich kann aber bis jetzt, Ende Dezember 1917, nicht behaupten, daß ich sichere anodische Eikerne festgestellt habe. Der Fruchtknoten der einfachsten Pflanzen ist für den nicht berufsmäßigen Pflanzenmorphologen nicht gerade leicht zu bearbeiten. Der Nucellus der Pflanzen besitzt außer dem Ei zwei Synergiden mit Zellkernen, die den eindringenden Spermakern empfangen, er hat ferner Pol-Kerne, die sich mit dem zweiten Spermakern, — gleichzeitig mit der Vereinigung von Eikern und ersten Spermakern —, ebenfalls vereinigen. Auf dicken Schnitten, wie man sie mit der freien Hand erhält, sieht man gewöhnlich dieses Bild nicht rein, sondern überdeckt von Zellen des Integuments, oder der Integumente, die den Nucellus, die Gebärmutter der Phanerogamen, einschließen.

Man muß in diesem Spezialgebiet zu Hause sein, oder jedenfalls mehr davon wissen als ich, um zu erkennen, ob der Embryosack empfängnisreif oder vielleicht schon befruchtet ist, Zustände, die naturgemäß von entscheidender Bedeutung für die elektrische Ladung sein müssen, die je nach dem Zustand vielleicht ihr Zeichen wechseln kann. Aus allen diesen Gründen muß ich die endgültige Untersuchung dieser lockenden Aufgabe anderen überlassen.

Aus den mit Farbstoffen durchgeführten Tinktionen der Biologen würde sich mit großer Wahrscheinlichkeit ergeben, daß das Keimbläschen der Tiere, das genauer untersucht ist als das

pflanzliche und das als „heller Keimfleck“ beschrieben ist, mit einem kleinen gefärbten Nucleolus aber ohne eigentlichen färbbaren Kern, anodisch geladen sein könnte, denn saure Farbstoffe können im lebenden Präparat nicht durch die kathodischen Außenschichten durchdringen, wenn nicht der Kern selber zufällig durch einen Schnitt getroffen ist (und selbst dann nicht immer durch die vom Messer daraufgeführten kathodischen Protoplasmaschichten). Anoden lebend zu tingieren, gelingt nur unter besonderen Umständen durch Antrocknen des Schnittes und besonders vorsichtige Behandlung. Es könnte also sein, daß der weibliche Eikern anodisch ist, wie er mir auf Serien-Handschnitten durch Fruchtknoten von Convallaria majalis (Maiglöckchen) erschienen ist, und zwar sowohl im anodischen Präparat als im kathodischen Kontrollpräparat durch Nichtfärbung. Den Embryologen ist diese Erscheinung nicht unbekannt unter der Bezeichnung, daß der Eizellkern „chromatinarm“ ist und das „Chromatin“ des Spermakerns „zur Befruchtung benötigt.“ Chromatin in diesem Zusamenhang bedeutet einen Protoplasmabestandteil, der sich mit basischen (kathodischen) Farbstoffen tingiert, allerdings fast ausschließlich in fixierten Zellen.

Die parthenogenetische Entwicklung hat seither gezeigt, daß das Chromatin des Spermakerns für die Befruchtung nicht so unentbehrlich ist, sondern daß die charakteristische Ladung gewisser Ionen den Spermakern für die ersten Stadien der Befruchtung ersetzen kann.

Die elektrische Differenzierung der Geschlechtszellen ist auf keinen Fall eine einfache Sache. Ich vermute, daß bei der letzten Reifeteilung der Pollen und der Eizellen, oder der Spermatozyten und Ovozyten, ein komplizierter Apparat geschaffen wird und auf beiden Seiten ein kathodischer und ein anodischer Mechanismus entstehen. So wie beim pflanzlichen, stark kathodischen Pollen, gewisse Punkte öfter eine anodische Ladung zeigten, so trägt der stark kathodische Kopf der Spermatozoiden einen anscheinend relativ anodischen Schwanzteil. Wenn nicht die Eizelle selber anodische Ladungen auf sich hat, so werden diese sich ganz sicher bei den Synergiden oder den Antipodenzellen finden. Jedenfalls habe ich anodische Komplexe innerhalb der Integumente des Fruchtknotens gesehen.

Leider ist aus der vorliegenden embryologischen Literatur sehr wenig direkt über die chemische Natur des Eikerns zu ersehen. Ich besitze einige Tausend Seiten Literatur und Abbildungen von embryologischen Färbungen. Fast die ganze tierische Literatur bezieht sich auf Schnitte von fixierten toten Präparaten, aus denen direkte Folgerungen über elektrische Lebend-Ladungen nicht ohne weiteres abgeleitet werden können. Bei den Pflanzen warnt Strasburger davor, weibliche Geschlechtszellen zu färben, weil sonst durch Mitfärbungen des einschließenden Integuments und der Embryosackzellen das Präparat unübersichtlich wird. Mit dieser Warnung hat Strasburger recht, wie ich mich bei verschiedenen Pflanzen: Begonien, Maiglöckchen, Lilien, Primeln und Gladiolen überzeugt habe. Es tritt auch noch der Uebelstand ein, daß die unbefruchteten Nucellus-Schnitte aus dem Fruchtknoten leicht herausfallen, da sie nur ganz lose an der Placenta hängen.

Die durchsichtigen Fruchtknoten eignen sich unzerschnitten für die elektrolytische Analyse nicht, weil die Schutzladung der äußeren, gewöhnlich kathodischen Epidermis das Eindringen anodischer Reagentien in die Eizelle verhindert, die ja dreifach bis fünffach eingekapselt ist. Die indirekten Gründe, weshalb ich die Eizelle anodisch ansehe, sind etwa folgende:

1. Die gebräuchlichen Bilder an den fixierten Präparaten z. B. mit Sublimat-Eisenhämatoxylin zeigen den Eikern hell, gewöhnlich auffallend farblos auf dunklen oder schwach gefärbtem Hintergrund. Sichere Kathoden mit derselben Methode gefärbt, z. B. Nerven, Muskeln u. s. w. zeigen die Eisen-Hämatoxylin-Methode als kathodisches Reagens. Fixier-Präparate sind jedoch nicht beweisend für den Lebenszustand.

2. Alle Bilder zeigen den Nukleolus des Eikerns in einem auffälligen Kontrast zum Eikern, zur „Keimblase", der Nukleolus wird von älteren Forschern nach Lebendfärbungen übereinstimmend in allen chemischen Histologien als sauer beschrieben, d. h. als sich mit basischen Farben tingierend. Solche Zellteile aber sind nach den hier mehrfach dargelegten Gründen im normalen Leben kathodisch, d. h. in Wirklichkeit basisch. Aus dem Kontrast zwischen Nukleolus und unbefruchtetem Eikern ergibt sich also ebenfalls mit großer Wahrscheinlichkeit, daß der unbefruchtete Eikern im Leben anodisch ist.

3. Meine eigenen Tastversuche mit dem Quadranten-Elektrometer ergaben, allerdings nicht mit voller Sicherheit, eine relative Anodizität der Narbe, die ich unter dem Mikroskop elektrochemisch nicht bestätigen konnte.

Es ist zu erwarten, daß ein geschickterer Experimentator als ich die Anodizität des Eikerns feststellen wird. Darunter ist zu verstehen, daß nur die Hauptmasse des Eikerns anodisch reagieren wird, der Nukleolus sicher und die Chromatinfäden höchstwahrscheinlich werden sich als Kathoden erweisen.

NEUERE VERSUCHE AN EIZELLEN.

Nach dem unsicheren Ausfall meiner ersten Versuche suchte ich weiter in der Literatur nach Hinweisen auf mikrochemische Säure- oder Basenanalysen an unbefruchteten Geschlechtszellen. Es ergab sich, daß im letzten Vierteljahrhundert die Untersuchung frischen, lebenden Gewebes bei Tieren ganz aus der Mode gekommen und bei Pflanzen, die sich lebend schneiden lassen, sehr selten geübt wird. In der neuesten Auflage des großen botanischen Praktikums von Strasburger-Koernicke*), hier fortab als Koernicke zitiert, findet sich eine Beobachtung, die sich vielleicht für den anodischen Eiapparat deuten läßt:

Koernicke sagt: „Am Scheitel jeder Synergide — (die beiden Synergiden, Gehilfinnen, erwarten die Spermakerne an der Mikropyle, der Eingangspforte des Eiapparates und führen die männlichen Kerne zur Befruchtung einerseits an die Eizelle, andererseits zu den Polkernen) — fällt uns hier eine homogene Kappe auf. Es ist der sogenannte Fadenapparat. Behandelt man ein solches Präparat mit Chlorzinkjodlösung, so sieht man die Synergiden-Kuppe sich violett färben. Sie besteht somit aus Zellulose. Die übrigen Zellteile der Synergiden und des Eis färben sich gelbbraun.“

Ich weiß nicht sicher, ob ich diese Beobachtungen, die einzigen, die ich bisher in der pflanzenphysiologischen Literatur über den Chemismus der lebenden Eizelle fand, für mich deuten darf. Die Violettfärbung mit Chlorzinkjod ist wohl

*) Jena, Gustav Fischer, 1912.

höchstwahrscheinlich ebenso wie die Braunfärbung eine nur an Anoden vorkommende Tinktion, wobei ich davon absehen will, ob die Violettfärbung im positiven Fall Zellulose anzeigt (im negativen sicher nicht, d. h. kathodische Zellulose fällt kein Jod aus). Leider nur ist bei Koernicke nicht erwähnt, ob die Violettfärbung sofort oder erst nach 24 Stunden eintrat. In dem letzteren Falle kann ich sie nicht als Beleg für Anodizität anführen, da das Gewebe zu dieser Zeit längst tot und elektrisch entladen ist.

Ich habe die Versuche mit Chlorzinkjod mehrfach wiederholt, nachdem ich in blühenden Primeln ein Objekt gefunden hatte, das sehr zahlreiche Eikerne enthält, auf jeden Schnitt zehn oder zwölf, wobei man immer ein oder zwei Synergiden mit dem Schnitt trifft. Ich glaube, beobachtet zu haben, daß die Synergidenkuppe sofort violett wird, also anodisch reagiert.

*

GALVANOMETER-VERSUCHE.

Die richtige Kontrolle der Berlinerblau-Methode wäre ein statisches Quadranten-Elektrometer, dessen Zuleitung durch ein Uhrwerk ohne Berührung mit lebenden, statisch geladenen Händen und in jener gleichmäßigen Langsamkeit, die nur mechanisch erzeugt werden kann, über ein mikroskopisches Objekt geführt werden würde, bei dem die Polaritäten vorher durch Berlinerblau ermittelt sind. Leider aber ist mein Elektrometer ruiniert und kann jetzt nicht repariert oder ersetzt werden. Auch ein Kapillar-Elektrometer, das noch am ehesten ein Quadranten-Elektrometer vertreten könnte, habe ich nicht erhalten können.

Es blieb nun die Möglichkeit, zu Kontrollversuchen ein Galvanometer zu benützen, welches ich durch die Güte des Herrn Hofrat Armin Tschermak Edler von Seysenegg, Direktor des physiologischen Instituts der Prager deutschen Universität, zur Verfügung gestellt erhielt. Ich bin dem genannten Gelehrten zu tiefstem Dank verpflichtet, da er trotz seiner Inanspruchnahme als Lehrer und Leiter eines Instituts, dessen sämtliche Mitarbeiter eingerückt sind, ferner als Kommandant und Oberstabsarzt des Kriegsspitals, in das er sein Institut umgewandelt hat, es sich nicht nehmen ließ, mich und meine Mitarbeiterin in der Handhabung seines Instrumentes einzuführen. Indem ich ihm an dieser Stelle danke, möchte ich nicht unterlassen hinzufügen, daß für meine Schrift, die zu jenem Zeitpunkt bereits größtenteils ausgedruckt war, Hofrat von Tschermak und sein Institut nicht mitverantwortlich sind, zumal die Untersuchungen in seiner Abwesenheit ausgeführt wurden.

Das Hauptobjekt, das ich mir für die elektrophysiologische Kontrolle vorbereitet hatte, war die auffallende Potentialdifferenz zwischen kathodischem Bast und ebensolchem Kambium-

ring auf der einen Seite, und weniger kathodischem oder vielleicht anodischem Holzring auf der andern Seite. Während sonst im Holz gewöhnlich noch lebende — also kathodische — Zellkomplexe verstreut sind, zeigt das Bild eines Querschnitts mehrjähriger Araucaria-Zweige (wie auf der Tafel ersichtlich) einen anodischen Holzteil und einen tief blauen Bastteil, der insbesondere im gewaschenen Kathodenbild mit Glyzerinlösung von Blutlaugensalz sehr scharf, mit freiem Auge sichtbar, hervortritt. Da man in jeder Elektrophysiologie nachlesen kann, daß das Innere der Pflanzen regelmäßig negativ-elektrisch (kathodisch) ist, so mußte ich den Querschnitt wohl kathodisch vermuten, aber das Holz sehr schwach, nahezu neutral gegenüber der unverletzten Oberfläche. Es ergab sich jedoch gleich bei den ersten Vorversuchen, daß das Holz des frischen Zweiges gegenüber der an der unverletzten Oberfläche angelegten zweiten Elektrode direkt und stark anodisch sich verhält, im Gegensatz zu der sonstigen elektrophysiologischen Grundregel des sogenannten Längsquerschnitt-Stromes und in genauer Übereinstimmung mit der Berlinerblau-Methode. Ich hatte die Zweige sehr schräg geschnitten um breite Flächen gleichnamigen Potentials zum Anlegen der groben Pinselelektroden zu erhalten und bisher etwa 30 oder 40 Holzbastbestimmungen an verschiedenen Tagen — bei diffusem Tageslicht — ausgeführt, die, bis auf ganz wenig Ausnahmen, eine gute Übereinstimmung zeigten.

Dagegen haben weitere Versuche mit feinerer, differenzierterer Struktur, an Kamelienzweigen, an dem Mark von Araucaria, oder Versuche, die Elektroden langsam vorzurücken, um eine Kurve der Ladungen zu bestimmen, bisher keinen Erfolg gehabt. Diese Experimente werden fortgesetzt.

Zu den Holz-Bast-Versuchen ist noch zu bemerken, daß eine grundsätzliche Bedeutung in ihnen liegt, die sich aus Folgendem ergibt: Während der normalen Belichtung der Pflanzen herrscht im allgemeinen eine chemische Stoffverteilung nach der Richtung vor, daß Holz, Gefäßsystem und Wurzelhaare neutrale oder relativ saure Säfte führen, während der Weichbast (Siebteil) und das Kambium wie wohl die meisten lebenden protoplasmatischen Rinden-Zellen relativ basische Produkte, ferner auch alle Alkaloïde der Pflanze enthalten.

Bei Koernicke (p. 156) heißt es: „Der Zellsaft reagiert meist sauer, oft aber auch alkalisch, das Protoplasma alkalisch.“ Auch ein ganz rasches Eintauchen der Querschnitte in Säurefuchsin, welches durch den schwächsten Alkaligehalt entfärbt wird, mit nachfolgendem Abspülen zeigt das Holz rosa im nahezu farblosen Bast und Kambium.

Da nun die Berührung von saueren und alkalischen Lösungen mit je einer Elektrode eines geschlossenen Stromkreises gesetzmäßig einen Alkali-Säure-Strom in der Richtung zur Säure erzeugt, so müßte das Holz die Kathode sein und der Bast die Anode, das heißt, die Basen und Säuren würden sich vermischen und neutralisieren, indem das positive Anion in der Richtung zur Bast-Anode wandern müßte, um dort die vorhandenen Alkaloide usw. zu neutralisieren. Wir wissen ganz sicher, daß im anorganischen Laboratorium dieser Weg allein eingeschlagen und die alkalischere Bastseite Anode sein müßte. Ebenso gewiß ist es aber jetzt, daß im lebenden Zweigquerschnitt nicht das Anion Ferrozyan zum Bast geht, sondern zum Holz und das Kation Eisen im Eisenchlorid zum Bast und nicht zum Holz. Diese paradoxe Bewegungsrichtung wird nunmehr durch den Galvanometerversuch bestätigt, der auch für die Anhänger der älteren Methoden klar erweist, daß der Bast, der sich mit basischen Stoffen anfärbt, Kathode ist.

Ich habe auch versucht, die Säurenatur des Gefäßsaftes durch Prüfung von Querschnitten mit der Zunge zu erkennen. Das ist mir aber bei Araucaria nicht gelungen. Die Azidität ist, wenn vorhanden, für die Geschmacksempfindung zu schwach.

Das Grundsätzliche, Neue und Unterscheidende dieses Versuches wird vielleicht an einem anderen Beispiel erhellen, dessen Chemismus den Physiologen vertrauter ist, nämlich an dem Magen-Darmkanal der höheren Tiere, in dem an den Magendrüsen saure Stoffe auftreten und tiefer unten in der Gegend Pankreas-Ausführungsgang im Duodenum basische Lösungen. Wenn die jetzt herrschende Richtung den Vorgang richtig sieht, so müssen diese Säuren und Basen gleichsam rein chemisch entstehen, sie sind plötzlich da und neutralisieren sich in der Pylorusgegend bei ihrer Begegnung. Dann muß bei kontinuierlichem Gang diese Neutralisierung eine gleichsam nebensächliche oder zufällige Säurealkalikette entstehen, die ohne

physiologisch dirigierende Wirkung ist und nur die Anionen nach der Pankreasgegend verschiebt und die Kationen in der Richtung der sauren Magendrüsen.

Nach der hier vertretenen Auffassung jedoch wandern die Anionen entgegengesetzt, — zumindest in der Phase der Magendrüsen-Absonderung, — in der Richtung gegen die Fundusdrüsen. Da ich nun schon ein aufgestelltes Galvanometer und Frösche hatte, so versuchte ich es mit einem Winterfrosch, der aber natürlich einen leeren Magen hatte und dessen innere Wand entgegengesetzt geladen war, nämlich kathodisch gegen die Darmwand-Innenseite. Ich wiederholte den Versuch mit einem Meerschweinchen im Verdauungsstadium und fand, wie gewünscht, die Magenwand anodisch gegen die Wand des Duodenums.

Ich habe ferner versucht, die Potentialverteilung im Holze selber und im Bast genauer zu ermitteln und namentlich die scharfe kathodische Sternfigur um das Mark galvanometrisch zu verifizieren, was aber bisher nicht gelungen ist. Im Gegenteil, das Mark der Araucaria, das sich, offenbar wegen seines Gerbstoffgehaltes, schon mit Eisenchlorid allein tintenartig färbt und deutlich kathodische Zellmembranen mit anodischem Zellprotoplasma tinktoriell erkennen läßt, erweist sich als Ganzes am Galvanometer überwiegend anodisch, eher noch stärker anodisch als das Holz. Ein von der Rinde und dem Bast befreites Zweigchen zeigt also den entgegengesetzten Längsquerschnittstrom wie ein normales Nerven- oder Muskelpräparat. Insoweit als die Oberfläche des Hölzchens nicht gleichmäßig anodisch reagiert, ergibt die nachfolgende Versuchsfärbung mit Berlinerblau, daß auf dem Holz durchsichtige, frisch nicht erkennbare Basthäutchen zurückgeblieben sind, die sich mit Eisenchlorid-Ferrozyankalium blau abheben.

Diese umgekehrte Versuchsanordnung, wobei das Berlinerblau-Verfahren die durch das Galvanometer ermittelten scheinbaren Abweichungen von der Regel bestätigt, zeigt aufs neue, daß die Zersetzung des Eisenchlorids durch lebende Zellquerschnitte die Verteilung der vorhandenen Elektrizitätsquellen mit voller Sicherheit anzeigt, allerdings nur in qualitativer Weise. Ich habe auch Versuche unternommen, ältere Querschnitte, welche schwächere Galvanometer-Ausschläge gaben,

durch schwächere Blaufärbung elektrohistologisch zu differenzieren, das ist mir aber nicht gelungen. Auch mit fein abgewogenen Maßlösungen wird sich wohl kaum quantitativ Sicheres mit dem Berlinerblau-Verfahren ermitteln lassen. Dagegen ist die Methode hinsichtlich der örtlichen feinen Verteilung der Ladungen naturgemäß dem Galvanometer weit überlegen. Wenn man beispielsweise den allen Elektrophysiologen wohlvertrauten Ischiadicus - Nerven des Frosches mit Berlinerblau kathodisch färbt, so erkennt man den Querschnitt (negativ) tief blau, aber die Oberfläche keineswegs so rein weiß, wie man es nach der Positivität am Galvanometer erwarten könnte, sondern die zahlreichen, mit freiem Auge unsichtbaren Zellquerschnitte von Bindegewebe, Gefäßen, durchschnittenen Seitenästen usw., die vom Präparieren herrühren, treten deutlich blau, schon mit freiem Auge sichtbar, hervor.

Der Strom schwächt sich nach einiger Zeit ab, um schließlich ganz zu verschwinden, was ich aber nicht abwarten konnte, sondern aus den übereinstimmenden Zeugnissen aller Elektrophysiologen entnehme, die sich damit beschäftigt haben. Nach dem Erlöschen des sogenannten Querschnitt-Stromes gibt ein frischer Querschnitt einen neuen Strom von ungefähr normaler Stärke. Ich erwähne diese bekannte Tatsache nur deshalb, weil sie mir als ein neuer Beleg erscheint für meine Behauptung, daß nicht die Markscheide, sondern vor allem der Achsenzylinder selbst aus einem ganz ausgezeichneten Isolationsmittel bestehen muß, daß also beispielsweise der Nerv, so paradox es klingt, in der Richtung seiner Reizleitung elektrisch ein vollkommenes Dielektrikum ist. Wie könnte er sonst acht Tage lang in einer Faser von wenigen Millimeter Länge seine charakteristische Ladung gegen die Oberfläche bewahren, nachdem er dutzende Male am Galvanometer entladen und immer wieder in Ringerlösung gelegt worden ist? Wie könnte namentlich ein neuer Querschnitt noch nach Tagen die nahezu normale Ladung ausweisen, wenn der Nerv, wie die Elektrophysiologen annehmen, in seiner Längsrichtung wirklich besser leiten würde als in der Querrichtung? Was makroskopisch durch Widerstandsmessung gefunden wurde, kann absolut nicht auf das mikroskopische Einzelelement des Achselzylinders bezogen werden, der ganz sicher sich als hervorragender Isolator er-

weisen wird, bis man einmal ein Galvanometer mit mikroskopischen Zuleitungen besitzen wird.

Bei der Gelegenheit meiner Galvanometer-Versuche bemühte ich mich auch, eine Tatsache richtig zu ermitteln, die ich in den Handbüchern so dargestellt finde, daß sie im direkten Widerspruch zu meiner Hypothese der anodischen Wurzelausscheidung der Pflanzen steht. In der Literatur, auch im „Handwörterbuch der Naturwissenschaften" wird gewöhnlich ein Schema der Elektrizitätsverteilung der Pflanze abgebildet, nach welchem die Wurzeloberfläche Kathode ist gegenüber der Blattoberfläche. Ich habe also Wurzeln von Vallisneria spiralis und von Tulpen am Galvanometer untersucht, wobei in allen Fällen die ziemlich erhebliche Anodenladung gegenüber der Stengeloberfläche festgestellt wurde. Die Ströme waren annähernd von der Größenordnung des Nervenstroms.

Ich habe dann, nachdem die Anodizität der unverletzten Wurzeloberfläche feststand, die Wurzeln vorsichtig mit einem scharfen Skalpell angekratzt, um die Zellen zum Vorschein zu bringen, die sich mit Berlinerblau kathodisch färben, wobei ich darauf Bedacht nehmen mußte, nicht den Zentralzylinder der Wurzeln zu berühren, der im Berlinerblaubild anodische Stellen zeigt. Dieser Versuch gelang vollkommen, der Strom (gegenüber der unverletzten Blattoberfläche) kehrte sich um und war ziemlich stark.

Es blieb noch übrig des Ankratzen des Stengels mit Schonung der mit freiem Auge sichtbaren, teilweise anodischen Gefäßstränge. Auch dieser Versuch gelang vollkommen. Der Strom gegenüber der unverletzten anodischen Wurzeloberfläche verstärkte sich, wie es erwartet werden mußte.

Die Knolle der Tulpe, die eine braune, scheinbar tote borkenartige Oberflächenschicht besitzt, wies die unverletzte Oberfläche anodisch aus, die angekratzte mit der Freilegung lebenden Zellinhaltes war stark kathodisch, wie es ebenfalls nach dem Berlinerblaubild zu erwarten war.

Dagegen ergaben Versuche mit der Wurzeloberfläche einerseits und dem Wasser der Nährlösung der Wasserpflanze Vallisneria spiralis andrerseits auch bei Wiederholungen keinen Ausschlag am Galvanometer. Dies beweist noch nicht,

daß die Wurzel keine Anodenladung gegenüber ihrer Nährlösung hat, sondern dürfte seine Ursache darin haben, daß der Widerstand des direkten Potentialausgleiches Wurzeloberfläche-Nährlösung verschwindend klein ist gegenüber dem Widerstand des von mir benützten Galvanometers. Ich glaube noch immer bestimmt, daß eine statische Messung von Wurzeloberfläche und Nährlösung die Richtigkeit meiner Vermutung bestätigen wird.

SCHLUSSBETRACHTUNG.

Die vorliegende Arbeit war schon größtenteils ausgedruckt, als mir im 43. Band (1913) des „Anatom. Anzeiger“ eine zusammenfassende Darstellung von J. Arnold über seine Plasmosomen-Granulalehre zukam. Der verstorbene Arnold war einer der wenigen Naturforscher, die den allergrößten Wert auf vitale und supravitale Färbungen legen und es beklagen, daß die glänzenden Erfolge der Fixationstechnik die Lebendfärbung ganz in den Hintergrund gedrängt haben. Leider ist mir der größte Teil der Lebensarbeit dieses Zellforschers, der auch schon die Wege des Eisenkations im lebenden Organismus untersucht hat, wegen seiner Veröffentlichung in schwer zugänglichen Akademieberichten nicht zugänglich. Um so mehr interessierte mich seine Plasmosomen-Theorie und ihr Verhältnis zur Mitochondrienlehre.

Arnold vertritt, wie ich aus der erwähnten Zusammenfassung entnehme, die Lehre, daß seine Zellgranula unter anderem die Fettsynthese im Tierkörper bewerkstelligen oder mit ihr in einem engen Zusammenhang stehen. Zu diesem Punkte habe auch ich Einiges zu bemerken, das eigentlich in das Kapitel „Die Reduktionskräfte der Zelle“ gehörte und das ich hier nachträglich vorbringen muß. Wenn ich Arnold recht verstehe, so bezeichnet er mit „Fettsynthese“ die Neuverbindung des Neutralfetts aus den Fettsäuren und aus Glyzerin, in die das Nahrungsfett im Verdauungskanal vorher gespalten worden war. In diesem Sinne wird der Ausdruck „Fettsynthese“ auch im „Handwörterbuch der Naturwissenschaften“ und in Oppenheimers „Handbuch der Biochemie“ gebraucht. Diese Art Fettsynthese ist aber nicht gerade die wunderbarste Leistung des Organismus. Der Energieumsatz bei dieser losen Anlagerung ist

so minimal, daß man sich leicht vorstellen kann, daß der Vorgang in derselben Zelle als Zerlegung und Wiedervereinigung reversibel verläuft. Die besondere starke Leistung des Tierkörpers liegt in einer wirklichen Fettsynthese aus Stärke über dem Umweg des Traubenzuckers, eine Leistung, die auch schon ein einzelliges Lebewesen, die Hefezelle, zuwege bringt.

Vergeblich habe ich in den mir zugänglichen Werken nach einer Hervorhebung der Energetik dieser eigenartigen chemischen Leistung gesucht. Ich fand nur in Fränkels „Dynamischer Biochemie“ *) einen ganz kurzen Hinweis, daß die Entstehung von Fettsäuren aus Kohlehydraten eine „Kondensation“ nach dem Typus der Aldolkondensation über Azetaldehyd: $CH_3 . CHO + CH_3 . CHO = CH_3 . CH (OH) . CH_2 . CHO$ u. s. w. sein dürfte, worauf dann Fettsäuren aus den Aldolen oder den Polyoxysäuren entstehen. Fränkel zitiert noch ein paar Hypothesen ähnlicher Natur, die alle zu übersehen scheinen, daß zur Überführung von Kohlehydrat in hochmolekulare Fettsäuren ein Energieaufwand erforderlich ist, von dem man sich offenbar keine genaue Vorstellung gemacht hat, nämlich sicher etwa 150 Joule per Kohlenstoffatom oder ¾ Volt.

Beide Ziffern werden vielleicht dem reinen Biochemiker wenig sagen. Im Bilde der reinen Chemie gesprochen, wird also nebenbei aus unbekannten Energiequellen eine Arbeitsleistung verlangt, welche annähernd ein Drittel der Verbindungswärme von metallischem Natrium mit freiem Sauerstoff (419 Joules) ausmacht! Ich glaube nicht, daß die Urheber der vorerwähnten Annahmen sich dessen bewußt gewesen sind, welche Kräfteintensität überwunden werden muß, um im Raum einer Hefezelle von einem Tausendstel Millimeter Tiefe Glukose in Fettsäure umzuwandeln!

Diese Kraftäußerung im engsten Raum wird in der organischen Welt nur noch übertroffen vom Chlorophyllkorn, das in seinem Punktraum Kohlensäure mit einem Aufwand von sicher über 300 Joules zerlegt und auseinanderhält.

Wer meinen Darlegungen bis hieher gefolgt ist, wird vielleicht schon erraten haben, wieso diese ganz rohen quantitativen Schätzungen mit den elektrischen Kräften der Zelle in einem

*) Seite 92, 252 ff.

Zusammenhang stehen sollen. Wenn tatsächlich im engen Raum der Hefezelle (aber höchstwahrscheinlich auch im Epithel der Tubuli contorti der Niere) chemische Stoffe erscheinen, die sich so anziehen wie beispielsweise Wasserstoff und Kaliumpermanganat (1,5 Volt), so müssen wir erkennen, daß eine hochintensive Energie im Innersten der Zelle tätig ist, erstens um aus neutralen Nahrungssäften solche heftig sich anziehende Stoffe von einander zu lösen, zweitens die einmal getrennten zu verhindern, sich neuerlich zu verbinden.

Wir müssen daneben auch mit einer Vorstellung brechen, die uns im Unterbewußtsein Allen vorschwebte, nämlich, daß in der lebenden Zelle nur lauter halb neutrale Eiweißverbindungen die Lebenstätigkeit besorgen, eine Vorstellung, die man bisher niemals konkretisiert hat und die man auch nach Bedarf zeitweilig beiseite läßt, wenn gerade wieder auf die anthropozentrische Laboratoriumsidee zurückgegriffen wird, daß die Basen Säuren „anziehen“ und umgekehrt.

Der Inhalt der vorliegenden Schrift ist also, wie aus diesem Beispiel erhellt, quantitativ dahin zusammenzufassen, daß die Zellelektrizität sich nicht in der Größenordnung von 0,1 Volt bewegt, wie die Ableitung mit freiem Auge aus einer Vielheit von Zell-Kathoden mit Gegenpolen ergibt, sondern daß eine mikroskopische Elektrosonde Potentialdifferenzen von 1 Volt nachweisen wird.

Gleichgültig, ob man auf meine Vorstellung der starken elektrischen Zellkräfte eingehen will oder nicht, wird Einem an dem Beispiel der Fettsäureproduktion aus Kohlehydrat klar werden, daß in den Formeln der Biochemiker gewöhnlich etwas vergessen worden ist, was man chemische Potentiale der Zelle nennen könnte und was jedenfalls produktiver ist als die Idee der Oxydasen oder Reduktasen; denn niemand kann erwarten, daß ein Enzym Synthesen mit solchem Energieverbrauch auf einmal oder in Stufen bewerkstelligen kann. Es begreift sich auch leicht, daß Unna und ich zu nahezu identischen Resultaten kommen mußten, weil er die chemischen Potentiale der Zelle aufsuchte (Oxydations- und Reduktionsorte) und ich die elektrochemischen mit dem Nachdruck darauf, daß die Spannungen zehnmal so hoch sind, als sie makroskopisch gemessen werden können.

Abgesehen von diesem Quantitätsstreit steht es fest, daß ein Eisenkation auch durch 0,1 Volt elektromotorische Kraft eine ganz fest umrissene Wanderungsrichtung zwangläufig erhalten muß und daß die Kathoden, die man mit Berlinerblau ausfärbt, sicher Kathoden sind. Es ist nur nicht ganz sicher, daß man mit Berlinerblau alle Kathoden erhält, denn wenn beispielsweise der Achsenzylinder des Nerven durch irgendwelche Sicherungseinrichtungen seine charakteristische Lebensladung länger überlebend erhält als das übrige Zellprotoplasma, so stößt er das Ferrocyan weiter ab und kann nicht blaugefärbt werden, obzwar er stärker kathodisch sein könnte als andere blaugefärbte Zellteile.

ERLÄUTERUNG DER TAFELN.

Fig. 1. Querschnitt eines Araucaria Zweiges, schematisiert. Den deutlichsten Kontrast zeigt der in der kathodischen Färbung tiefblaue Kambiumring. Eisenchlorid 5%, hierauf nach Antrocknen der Eisenlösung gelbes Blutlaugensalz 5%.

Fig. 2. Dasselbe Objekt, zuerst Blutlaugensalz, dann nach Antrocknen Eisenchlorid. In der Zeichnung fehlt der blaue Ring um das Präparat, der im Anodenbild regelmäßig erscheint.

Fig. 3. Kamelie. Querschnitt eines Blattstieles. Nach Eisenchlorid ½ Minute in Wasser abgespült, hierauf in Ferrozyankalium. Spätere genauere Versuche ergaben bloß die Membran der Epidermis kathodisch.

Fig. 4. Dasselbe, zuerst Ferrozyankalium, hierauf Antrocknen ohne Abspülen, Eisenchlorid.

Fig. 5. Dasselbe Objekt. Kathodenbild in Bleiacetat und Kaliumjodid. Die Pflanze 16 Stunden verdunkelt.

Fig. 6. Kathodenbild der verdunkelten Pflanze in Berlinerblau. Auffällig die farblose Epidermis.

Fig. 7 u. 8. Längsschnitte der normal belichteten Pflanze.

Fig. 9 u. 10. Angetrocknete Pollen mit Kristallen.

Fig. 11 u. 12. Pollen von Gladiolus. Berlinerblau.

Fig. 13. Längsquerschnitt-Elektrizität. Angeschnittenes Hyazinthenblatt mit kathodischer Berlinerblau-Färbung. Die gebläuten Stellen sind angeschnittene Flächen.

Fig. 14. Hyazinthe, Wurzelquerschnitt. Kathodenbild. Berlinerblau.

Fig. 15. Dasselbe. Anodenbild. Etwas überfärbt.

Fig. 16. Knorpel vom Frosch. Kathodenbild.

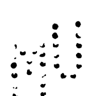
Fig. 17. Dasselbe. Anodenbild.

Fig. 18. Rote Blutkörperchen vom Frosch. Kathodenbild.

Fig. 19. Dasselbe. Anodenbild.

Fig. 20. Niere. Kaninchen. Kathode.

Fig. 21. Niere. Meerschweinchen. Kathode.



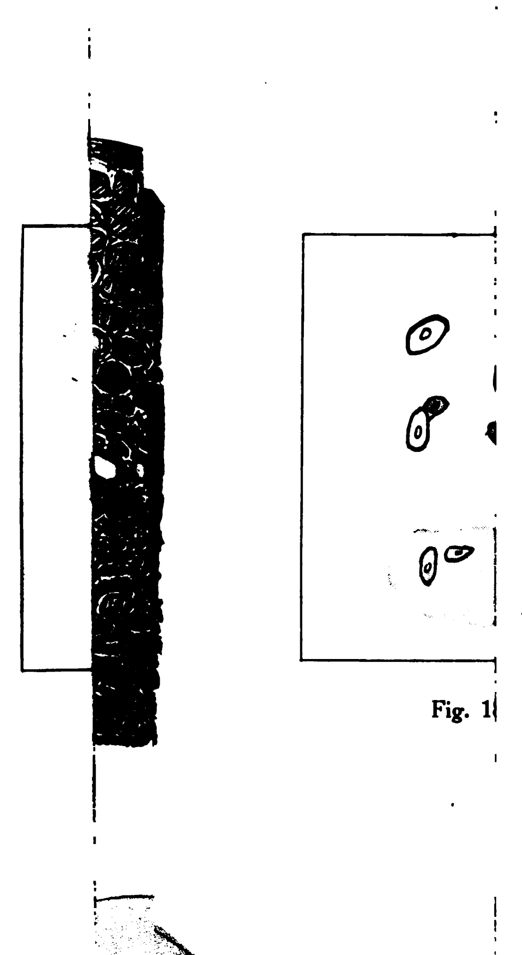
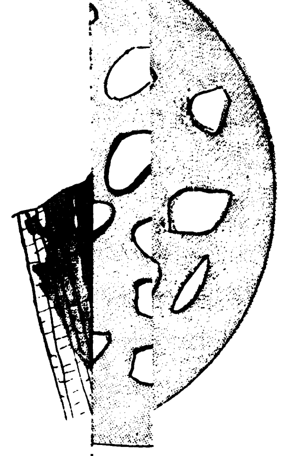


Fig. 1



. 17.

